



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

«Επεξεργασία Πυκνών Λυμάτων μέσω Τεχνητού Υγροβιότοπου σε ξηρά κλίματα»



Στεφανόπουλος Κυριάκος

Εξεταστική επιτροπή :
Διαμαντόπουλος Ευάγγελος (επιβλέπων)
Νικολαΐδης Νικόλαος
Καρατζάς Γεώργιος

Χανιά
Φεβρουάριος 2006

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Φυσικά Συστήματα	- 6 -
1.1 Εισαγωγή	- 6 -
1.2 Πλεονεκτήματα φυσικών συστημάτων	- 7 -
1.3 Μειονεκτήματα φυσικών συστημάτων επεξεργασίας	- 8 -
1.4 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων από φυσικά συστήματα επεξεργασίας	- 8 -
1.5 Τύποι φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	- 9 -
1.5.1 Βραδείας εφαρμογής (Slow-rate systems)	- 9 -
1.5.2 Ταχείας διήθησης ή εφαρμογής (Rapid Infiltration)	- 11 -
1.5.3 Επιφανειακής ροής (Overland Flow systems)	- 11 -
1.5.4 Λίμνες σταθεροποίησης (Stabilization Ponds)	- 12 -
1.5.5 Υγροβιότοποι (Wetlands)	- 13 -
Φυσικοί υγροβιότοποι	- 14 -
Συστήματα υποεπιφανειακής ροής (SFS)	- 14 -
Συστήματα επιφανειακής ροής (FWS)	- 15 -
1.5.6 Συστήματα επιπλέοντων υδροχαρών φυτών (Floating aquatic plant systems)	- 15 -
1.5.7 Υδατοκαλλιέργεια	- 16 -
1.6 Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρυπαντών	- 17 -
1.6.1 Απομάκρυνση BOD/ άνθρακα	- 17 -
1.6.2 Απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών	- 19 -
Καθίζηση	- 19 -
Φίλτρωση/ Συγκράτηση	- 20 -
Επαναιώρηση	- 20 -
1.6.3 Απομάκρυνση Αζώτου	- 21 -
Οργανικό άζωτο	- 22 -
Αμμωνιακό άζωτο	- 22 -
Βιολογική νιτροποίηση	- 22 -
Νιτρικό άζωτο	- 23 -
Βιολογική απονιτροποίηση	- 24 -
1.6.4 Απομάκρυνση φωσφόρου	- 24 -
Φυσικοί – χημικοί διαχωρισμοί	- 24 -
Βιολογικοί μετασχηματισμοί φωσφορικών	- 25 -
1.6.5 Απομάκρυνση παθογόνων οργανισμών	- 26 -
1.6.6 Απομάκρυνση μετάλλων	- 27 -
1.6.7 Άλλα οργανικά συστατικά	- 28 -
Κεφάλαιο 2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Κάθετης Ροής	- 30 -
2.1 Εισαγωγή	- 30 -
2.2 Παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας	- 31 -
2.3 Φαινόμενα φραξίματος των πόρων	- 32 -

Κεφάλαιο 3 Σχεδιασμός , Εγκατάσταση και Λειτουργία του Τεχνητού Υδροβιότοπου.	- 33 -
3.1 Εισαγωγή.	- 33 -
3.2 Πειραματική Διάταξη του τεχνητού Υδροβιότοπου.	- 33 -
3.3 Πληρωτικά υλικά	- 36 -
3.4 Βλάστηση.	- 37 -
3.5 Λειτουργία της μονάδας	- 38 -
3.6 Αναλυτικές Μέθοδοι.	- 39 -
BOD ₅	- 39 -
COD	- 40 -
TOC	- 40 -
TN	- 40 -
NH ₄ -N	- 40 -
SS	- 41 -
Ανιόντα	- 41 -
Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα	- 42 -
4.1 Οργανικός Άνθρακας.	- 42 -
BOD ₅	- 42 -
COD	- 45 -
TOC	- 49 -
4.2 Άζωτο	- 49 -
Ολικό Άζωτο	- 50 -
Αμμωνία	- 52 -
Νιτρικά	- 55 -
Νιτρώδη	- 57 -
4.3 Αιωρούμενα στερεά	- 60 -
4.4 Ανιόντα	- 62 -
Φωσφορικά	- 62 -
Θειικά	- 65 -
Χλώριο	- 67 -
Φθόριο	- 70 -
4.5 Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής	- 73 -
Μοντέλο Thornthwaite	- 74 -
Μοντέλο Hargreaves	- 75 -
Μοντέλο Blaney – Criddle	- 75 -
Μοντέλο Doorenbos and Pruitt	- 76 -
4.6 Ανάπτυξη της βλάστησης	- 78 -
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα – Προτάσεις	- 82 -
Βιβλιογραφία	- 85 -

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους, όσους, με βοήθησαν και πρώτα από όλα τον κύριο Διαμαντόπουλο Ευάγγελο για την επιλογή του θέματος και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υπεύθυνη του εργαστηρίου «Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος» του Πολυτεχνείου Κρήτης, κυρία Κουκουράκη Ελισάβετ για την άψογη συνεργασία καθώς και τους διδακτορικούς φοιτητές, για το ευχάριστο κλίμα και το πνεύμα συνεργασίας που επικρατεί στους χώρους του εργαστηρίου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Λαζαρίδη Μιχάλη, για την διάθεση των θερμοκρασιακών τιμών για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαφοής καθώς επίσης και τον μεταπτυχιακό φοιτητή Σπανάκη Νικόλαο που χωρίς αυτόν η πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κυρίους Νικολαΐδη Νικόλαο και Γεώργιο Καρατζά.

Στεφανόπουλος Κυριάκος

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετάται η απόδοση ενός τεχνητού υγροβιότοπου για την επεξεργασία πυκνών λυμάτων σε ξηρά κλίματα. Ο τεχνητός υγροβιότοπος είναι ένας υγροβιότοπος κάθετης ροής και αποτελείται από δύο γραμμές. Η μια γραμμή περιέχει φυτά (*Phragmites australis*) ενώ η άλλη όχι, με σκοπό να μελετηθεί ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής των φυτών.

Η λειτουργία της μονάδας ξεκίνησε την άνοιξη του 2005 και συνεχίστηκε ολόκληρο το καλοκαίρι, όπου παρατηρήθηκαν υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να παρατηρηθούν και υψηλοί ρυθμοί εξατμισοδιαπνοής. Οι παράμετροι που μελετούνται είναι το BOD₅, το COD, τα ολικά αιωρούμενα στερεά SS, τα NH₄⁺, το ολικό άζωτο TN, το TOC καθώς επίσης και τα ανιόντα: φωσφορικά, θειικά, νιτρικά και νιτρώδη.

Τα αποτελέσματα που μέχρι τώρα προκύπτουν δείχνουν ότι η ικανότητα καθαρισμού που επιτεύχθηκε είναι υψηλή για COD, BOD₅, και NH₄⁺ και ικανοποιητική για τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Κεφάλαιο 1 Φυσικά Συστήματα

1.1 Εισαγωγή

Φυσικές διεργασίες πάντα καθάριζαν το νερό καθώς έρεε διαμέσου ποταμών, λιμνών, ρευμάτων και υδροβιότοπων. Τις τελευταίες δεκαετίες κατασκευάστηκαν συστήματα που χρησιμοποιούν τις φυσικές αυτές διαδικασίες για να βελτιώσουν την ποιότητα του νερού [1]. Αυτά είναι τα Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων. *Γενικά, φυσικά συστήματα ονομάζονται αυτά που η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου διενεργείται με φυσικά μέσα και διεργασίες, όπως είναι οι φυσικές, χημικές ή συνδυασμό τους, που συμβαίνουν στο περιβάλλον έδαφος- φυτό- απόβλητο* [2].

Πολλές φορές, οι διεργασίες που εμπλέκονται στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι οι ίδιες με αυτές που συμβαίνουν στα μηχανικά ή συμβατικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι η καθίζηση, το φιλτράρισμα, η μεταφορά αερίων, η προσρόφηση, η ιοντική εναλλαγή, η χημική κατακρήμνιση, η χημική οξείδωση και αναγωγή και η βιολογική μετατροπή και αποδόμηση και άλλες, που είναι μοναδικές σε φυσικά συστήματα, όπως είναι η φωτοσύνθεση, η φωτοοξείδωση και η πρόσληψη από φυτά.

Στα φυσικά συστήματα οι διεργασίες συντελούνται με φυσικές ταχύτητες και τείνουν να διενεργούνται περισσότερες από μία συγχρόνως, σε ένα «οικοσυστηματικό αντιδραστήρα», σε αντίθεση με τα μηχανικά συστήματα στα οποία συμβαίνουν διαδοχικά και σε διαφορετικούς, σε σειρά αντιδραστήρες ή δεξαμενές, με επιταχυνόμενες ταχύτητες ως αποτέλεσμα της εισρέουσας σε αυτές ενέργειας. Τα φυσικά συστήματα κατατάσσονται σε δυο βασικές κατηγορίες [3],

- Αυτά που βασίζονται στο έδαφος ή τα γήινα συστήματα επεξεργασίας. Μετά την εφαρμογή προεπεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην επιφάνεια του εδάφους, επιταχύνεται περαιτέρω επεξεργασία τους δια μέσου των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, που συμβαίνουν στο έδαφος και βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς. Τα υδραυλικά φορτία εφαρμογής πρέπει να είναι συμβατά με το δυναμικό του κάθε συστήματος. Οι κύριοι τύποι συστημάτων επεξεργασίας με εφαρμογή τους στο έδαφος και σε βαθύτερους γεωλογικούς

σχηματισμούς είναι οι: α) βραδείας εφαρμογής, β) ταχείας διήθησης, γ) επιφανειακής ροής και δ) συνδυασμένοι τύποι.

- Τα συστήματα που βασίζονται στα υδροχαρή φυτά, όπως είναι οι φυσικοί και τεχνητοί υδροβιότοποι και τα συστήματα των επιπλέοντων υδροχαρών φυτών.

1.2 Πλεονεκτήματα φυσικών συστημάτων

Η τεχνογνωσία της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με μικρά αποκεντρωμένα συστήματα, σε συνδυασμό με την επαναχρησιμοποίηση των εκροών τους σε γεωργικές χρήσεις, έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια σε πολλές προηγμένες χώρες και ιδιαίτερα στις Η.Π.Α. Ιδιαίτερα, οι εξελίξεις και η τεχνογνωσία σε θέματα φυσικών συστημάτων έδωσε ενθαρρυντικά αποτελέσματα για εφαρμογή των συστημάτων αυτών σε μικρούς πληθυσμούς (μέχρι 10.000 ι.κ.). Τα συστήματα αυτά εντάσσονται πλήρως στη νέα νοοτροπία επιστροφής στα απλά, αποτελεσματικά συστήματα, συμβατά με φυσικές διεργασίες, χωρίς πολύπλοκους και ενεργοβόρους μηχανισμούς. Τέτοια συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και το κόστος λειτουργίας τους είναι συνήθως μικρό. Επίσης χαρακτηρίζονται από απλότητα και συμβατότητα με το φυσικό περιβάλλον. Τέλος τα κλιματολογικά δεδομένα περιοχών της Μεσογείου, ευνοούν μεγάλους ρυθμούς ανάπτυξης φυσικών συστημάτων, καθώς και ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης εκροών επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων κυρίως για άρδευση.

Γενικά τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας είναι υψηλού κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους, αντιμετωπίζουν συχνά λειτουργικά προβλήματα και είναι ενεργοβόρα, κυρίως κατά τη εφαρμογή τους σε μικρούς σχετικά Ο.Τ.Α. [2]. Οι τρεις κυριότερες περιβαλλοντικές συνέπειες των συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας είναι α) η μείωση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, β) η συμπληρωματική επιβάρυνση του περιβάλλοντος που σχετίζεται με την εξαγωγή και χρήση των μη ανανεώσιμων αυτών πηγών ενέργειας και γ) η τύχη των εναπομεινάντων υποπροϊόντων της επεξεργασίας σε συμβατικά συστήματα, όπως για παράδειγμα η ενεργός ιλύς [4].

Έτσι τα φυσικά συστήματα προτιμούνται από τα συμβατικά συστήματα λόγω : α) της απλότητάς τους, β) του χαμηλού κόστους κατασκευής και λειτουργίας των εγκαταστάσεων καθώς και των μικρών απαιτήσεών τους σε ενέργεια, και γ) της δυνατότητας συμβολής τους στην αναβάθμιση του περιβάλλοντος και στη δημιουργία χώρων αναψυχής [6].

1.3 Μειονεκτήματα φυσικών συστημάτων επεξεργασίας

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι οι μεγάλες απαιτήσεις τους σε φυσικό χώρο σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλα για εφαρμογή σε μικρούς πληθυσμούς αφού η έκταση και συνεπώς και το κόστος της γης που θα ήταν απαραίτητο για μια μεγαλύτερη πόλη θα ήταν απαγορευτικό. Παρ' όλ' αυτά φυσικά συστήματα επεξεργασίας έχουν χρησιμοποιηθεί και σε μεγαλύτερες πόλεις σε συνδυασμό με συμβατικά συστήματα για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας εκροών με πιο οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας έχουν τυπικά μεγαλύτερους χρόνους παραμονής (3 έως 200 μέρες) από τα συμβατικά συστήματα (λιγότερο από 1 έως 2 μέρες) και για αυτό είναι αποτελεσματικά μετά από ρύθμιση του όγκου και της ποιότητας της εισροής. Εξαιτίας του μεγάλου χρόνου παραμονής και επειδή τα φυσικά συστήματα βρίσκονται στην ύπαιθρο και εκτείνονται σε μεγάλες περιοχές που επηρεάζονται από καταιγίδες, ανέμους, φωτιές, έντομα, πλημμύρες και σεισμούς, τα συστήματα αυτά ανταποκρίνονται σχετικά αργά σε λειτουργικές αλλαγές αλλά ανταποκρίνονται σε φυσικές αλλαγές που δεν μπορούν να ελεγχθούν από τους διαχειριστές του συστήματος [4].

1.4 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων από φυσικά συστήματα επεξεργασίας

Η συνεχής πληθυσμιακή αύξηση, η ρύπανση και η συνεχής υποβάθμιση τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων νερών, η άνιση κατανομή των υδατικών πόρων και οι περιοδικές ξηρασίες καθιστούν αναγκαία τη διερεύνηση και ανάπτυξη νέων πηγών νερού. Στις βιομηχανικές χώρες υπάρχουν αυξανόμενα προβλήματα, που σχετίζονται με τη διασφάλιση της αναγκαίας τροφοδοσίας με νερό και τη διάθεση των αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Αντίθετα στις αναπτυσσόμενες χώρες και ιδιαίτερα σε αυτές με ξηρικές και ημιξηρικές περιοχές υπάρχει η ανάγκη τεχνολογίας προσιτού κόστους, για αύξηση των διαθέσιμων ποσοτήτων νερού και παράλληλη προστασία των υπαρχόντων πηγών νερού.

Γι' αυτό η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων φαίνεται ότι αποτελεί το πιο κατάλληλο μέσο στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ελλειμματικές περιοχές σε διαθέσιμους υδατικούς πόρους αναπτύσσουν νέες τεχνολογίες και προγραμματίζουν την επαναχρησιμοποίηση προεπεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.

Τέτοιες περιοχές, συνήθως, χαρακτηρίζονται από : α) περιορισμένους υδατικούς πόρους, που αντιμετωπίζουν και προβλήματα ρύπανσης οφειλόμενα κυρίως στην ελλιπή αραίωση, διασπορά και έκπλυση και β) μια αυξημένη ζήτηση νερού, κυρίως για άρδευση, ιδιαίτερα την περίοδο περιορισμένων βροχοπτώσεων.

Η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων, εκτός του ότι εξοικονομεί πηγές νερού όπως προαναφέρθηκε, μειώνει το κόστος επεξεργασίας και διάθεσής τους, περιορίζει την απαιτούμενη υποδομή για εκμετάλλευση και χρήση άλλων πηγών νερού και φυσικά περιορίζει το κόστος χρήσης τους και τις ρυπαντικές επιπτώσεις τους. Οι κύριες κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης προεπεξεργασμένων υγρών αποβλήτων με τη σειρά όγκου χρησιμοποιούμενου νερού είναι η γεωργική και κυρίως η άρδευση, η βιομηχανική, ο εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων και διάφορες άλλες. Από αυτές η άρδευση αντιπροσωπεύει στις μέρες μας αλλά ασφαλώς και στο προσεχές μέλλον τον πιο σημαντικό χρήστη νερού και προσφέρει σοβαρές δυνατότητες για απορρόφηση όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων ανακτώμενων υγρών αποβλήτων [3].

1.5 Τύποι φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Όλοι οι τύποι φυσικών συστημάτων επεξεργασίας απαιτούν προεπεξεργασία των χρησιμοποιούμενων υγρών αποβλήτων, με κάποια μηχανική ή συμβατική διεργασία. Η ελάχιστη προεπεξεργασία που συνιστάται είναι η εσχάρωση ή η πρωτοβάθμια καθίζηση, με σκοπό την απομάκρυνση των στερεών, που θα μπορούσαν να προξενήσουν προβλήματα στα δίκτυα διανομής ή να δημιουργήσουν ενοχλητικές συνθήκες στον περιβάλλοντα χώρο.

Οι τύποι των φυσικών συστημάτων είναι οι παρακάτω:

1.5.1 Βραδείας εφαρμογής (Slow-rate systems)

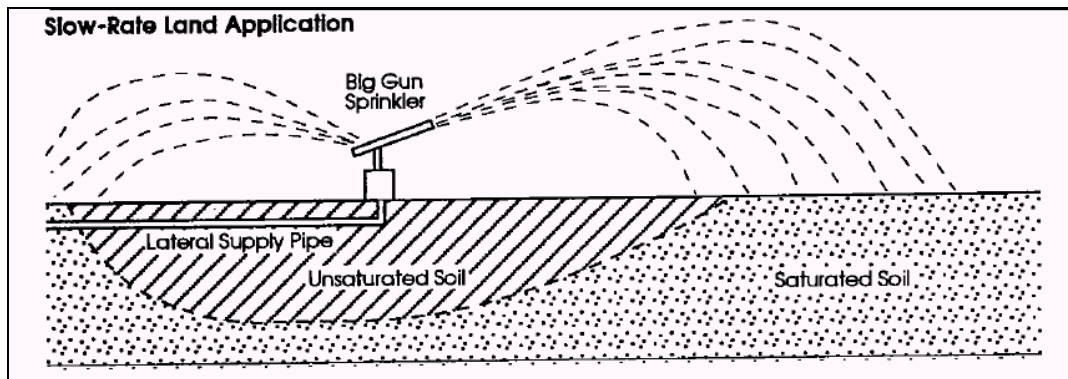
Η βραδεία εφαρμογή αποτελεί τον επικρατέστερο τύπο φυσικού συστήματος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Αυτό συνοπτικά περιλαμβάνει την ελεγχόμενη εφαρμογή του προεπεξεργασμένου αποβλήτου σε έδαφος με φυτική βλάστηση, με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία του και την ικανοποίηση εξατμισοδιαπνευστικών αναγκών της φυτικής βλάστησης.

Η επεξεργασία διενεργείται καθώς αυτό διηθείται στο έδαφος. Στις περισσότερες περιπτώσεις το απόβλητο κατεισδύει στον υποκείμενο υδροφόρο, αλλά είναι δυνατό να συναντηθεί με επιφανειακό νερό ή να ανακτηθεί με στραγγιστικά ή φρεατικά έργα. Η

εφαρμογή του υγρού αποβλήτου στο έδαφος μπορεί να γίνει με ποικιλία μεθόδων, όπως είναι οι επιφανειακές μέθοδοι (λεκάνες, αύλακες, και άλλες) ή με καταιονισμό. Με σκοπό την επικράτηση ακόρεστων συνθηκών στο έδαφος επιβάλλεται η μη συνεχής εφαρμογή του αποβλήτου σε αυτό.

Η σχετικά βραδεία εφαρμογή του αποβλήτου, σε συνδυασμό με την παρουσία της φυτικής βλάστησης και την ενδογενή δυνατότητα του εδαφικού οικοσυστήματος, δημιουργούν στα συστήματα βραδείας εφαρμογής υψηλό δυναμικό επεξεργασίας [3].

Τα συνηθέστερα προβλήματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή των συστημάτων βραδείας εφαρμογής σχετίζεται με την υπερεκτίμηση της μακροχρόνιας ικανότητας διήθησης του χώματος. Τα προβλήματα αυτά έχουν να κάνουν με τη δυσκολία υπολογισμού και επαλήθευσης του ρυθμού διήθησης κατά τις αρχικές έρευνες της περιοχής αλλά και με αλλαγές στη δομή του χώματος που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια κατασκευής ή λειτουργίας του συστήματος. Τα προβλήματα αυτά εμφανίζονται σε περιοχές με αργιλώδη εδάφη και σε εδάφη που κατά περιόδους ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα ή σε εδάφη που εξαιτίας χημικών και φυσικών διεργασιών μειώνεται η διαπερατότητά τους.



Σχήμα 1.1 - Σύστημα Βραδείας Εφαρμογής

Εξαιτίας της μεγάλης απαίτησής των φυσικών συστημάτων βραδείας εφαρμογής σε επιφάνεια γης και εξαιτίας του κόστους των απαιτούμενων σωληνώσεων και αντλιών για τη διανομή του αποβλήτου, τα συστήματα αυτά έχουν σχετικά μεγαλύτερο κόστος από τα υπόλοιπα φυσικά συστήματα επεξεργασίας [4].

1.5.2 Ταχείας διήθησης ή εφαρμογής (Rapid Infiltration)

Τα συστήματα αυτά ονομάζονται επίσης SAT (Soil-Aquifer-Treatment). Με τα συστήματα αυτά το υγρό απόβλητο, που έχει υποστεί προεπεξεργασία, εφαρμόζεται σε αβαθείς επιφανειακές λεκάνες διήθησης και επαναλαμβανόμενους κύκλους. Η εφαρμογή του αποβλήτου είναι δυνατή και με εκτοξευτές υψηλής ταχύτητας. Συνήθως σε τέτοιες περιπτώσεις δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη φυτικής βλάστησης πλην της περιπτώσεως όπου η εφαρμογή του αποβλήτου διενεργείται με εκτοξευτές.

Επειδή σε τέτοια συστήματα τα φορτία και οι ταχύτητες εφαρμογής είναι σχετικά υψηλά, οι απώλειες με εξάτμιση είναι μικρές και γι' αυτό ο μεγαλύτερος όγκος του εφαρμοζόμενου αποβλήτου κατεισδύει στο έδαφος, όπου διενεργείται περαιτέρω επεξεργασία του. Τα συστήματα ταχείας διήθησης περιλαμβάνουν επεξεργασία, που ακολουθείται από: α) εμπλουτισμό υπόγειου υδροφορέα για αναπλήρωση ή προστασία του κυρίως από διείσδυση και ανάμειξη με αλμυρό νερό, β) ανάκτηση με στράγγιση ή άντληση και γ) φυσική ροή του υπόγειου και απόληξη σε επιφανειακή πηγή.

Το δυναμικό επεξεργασίας με τέτοια συστήματα είναι κατά κάποιο τρόπο μικρότερο από αυτό των συστημάτων βραδείας εφαρμογής, εξαιτίας της μικρότερης κατακράτησης σε πιο περατά εδάφη εφαρμογής και με μεγαλύτερες ταχύτητες υδραυλικού φορτίου [3]. Παρόλο που απομακρύνονται ένα σημαντικό μέρος σωματιδιακής οργανικής ύλης και των θρεπτικών που περιέχονται στα προεπεξεργασμένα απόβλητα, οι διαλυμένες στο νερό ουσίες δεν ελαττώνονται.

Ένα από τα πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν στα συστήματα ταχείας εφαρμογής είναι η οξείδωση των αζωτούχων συστατικών στην αερόβια ζώνη του εδάφους με αποτέλεσμα την πιθανή αύξηση των νιτρικών στον υποκείμενο υδροφορέα. Ένα άλλο πιθανό πρόβλημα είναι η λανθασμένη εκτίμηση του ρυθμού διήθησης μακροχρόνια [4].

1.5.3 Επιφανειακής ροής (Overland Flow systems)

Τα συστήματα επιφανειακής ροής βασίζονται στην εφαρμογή του προεπεξεργασμένου υγρού αποβλήτου κατά μήκος της υψηλότερης πλευράς μιας διαβαθμισμένης, κεκλιμένης επιφάνειας με φυτική βλάστηση, που επιτρέπει τη ροή του σε όλη την έκτασή της και τη συλλογή της επεξεργασμένης εκροής στο τέλος της κλίσης της. Συνήθως, τα συστήματα επιφανειακής ροής εφαρμόζονται σε θέσεις με εδάφη σχεδόν αδιαπέραστα, αν και οι διεργασίες αυτών των συστημάτων έχουν εφαρμογή σε

μια ποικιλία εδαφικών τύπων και υδραυλικών αγωγιμοτήτων, επειδή η περατότητα του εδάφους σε τέτοια συστήματα μειώνεται σημαντικά με το χρόνο.

Με αυτά τα συστήματα η εδαφική διήθηση του αποβλήτου είναι περιορισμένη και αποτελεί μια μειωμένη υδραυλική δίοδο του αποβλήτου. Ο κύριος όγκος του εφαρμοζόμενου αποβλήτου συλλέγεται ως επιφανειακή απορροή. Μέρος του εφαρμοζόμενου αποβλήτου εξατμιοδιαπνέεται. Οι συνολικές απώλειες του αποβλήτου εξαρτώνται από την εποχή του έτους, τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες και το είδος της φυτικής βλάστησης.

Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με εναλλασσόμενες περιόδους εφαρμογής και ανάπαυσης (ξήρανσης). Η χρονική διάρκεια κάθε περιόδου εξαρτάται από το σκοπό της επεξεργασίας. Σ' αυτά τα συστήματα η διανομή γίνεται με εκτοξευτές υψηλής ή χαμηλής πίεσης ή με επιφανειακές μεθόδους, όπως είναι οι σωλήνες με ρυθμιζόμενες εξόδους [3].

Τα προβλήματα που εμφανίζονται στα συστήματα επιφανειακής ροής είναι 1) προβλήματα που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση της φυτικής βλάστησης και 2) προβλήματα που έχουν να κάνουν με την επίτευξη της απαιτούμενης απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών. Και τα δυο είδη αυτά προβλημάτων οφείλονται στη δυσκολία διατήρησης ομοιόμορφης ροής στις πλαγιές του κάθε συστήματος.

Η δημιουργία μικρών λιμνών στις πλαγιές ενός συστήματος επιφανειακής ροής με μικρή κλίση και έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του οξυγόνου του χόματος και τελικά το θάνατο της φυτικής βλάστησης. Επίσης μεγαλύτερες κλίσεις μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα τη διάβρωση του εδάφους και τελικά την αύξηση της συγκέντρωσης ανόργανων στερεών συστατικών στην εκροή. Ένας άλλος παράγοντας που επίσης μπορεί να συνεισφέρει στην αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών είναι η αδυναμία των συστημάτων επιφανειακής ροής να απομακρύνουν άλγη [4].

1.5.4 Λίμνες σταθεροποίησης (Stabilization Ponds)

Οι λίμνες σταθεροποίησης χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία μεγάλης ποικιλίας υγρών αποβλήτων, από οικιακά απόβλητα μέχρι και σύνθετα βιομηχανικά απόβλητα, και λειτουργούν κάτω από ένα μεγάλο εύρος καιρικών συνθηκών. Οι λίμνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μοναδικό μέσο επεξεργασίας ή σε συνδυασμό με άλλα συστήματα επεξεργασίας.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος λιμνών είναι οι επαμφοτερίζουσες λίμνες. Οι λίμνες αυτές έχουν βάθος 1,2 έως 2,5 m, με μια αερόβια ζώνη να βρίσκεται πάνω από μια αναερόβια ζώνη. Στην αναερόβια ζώνη λαμβάνουν χώρα αναερόβιες ζυμώσεις. Ο αερισμός της αερόβιας ζώνης επιτυγχάνεται από τη φωτοσύνθεση των αλγών και τον αερισμό από την

επιφάνεια. Τα άλγη που αναπτύσσονται στις λίμνες αυτές αποτελούν το κυριότερο πρόβλημα κατά τη λειτουργία τους.

Ένας άλλος τύπος λιμνών είναι οι αεριζόμενες λίμνες. Στις λίμνες αυτές ο αερισμός επιτυγχάνεται κυρίως με μηχανικό τρόπο και όχι μέσω της φωτοσύνθεσης και του επαναερισμού μέσω της επιφάνειας. Το κύριο πλεονέκτημα των αεριζόμενων λιμνών είναι ότι έχουν μικρότερες απαιτήσεις σε γη.

Οι αναερόβιες λίμνες λαμβάνουν τόσο βαριά οργανικά φορτία έτσι ώστε δεν υπάρχει δυνατότητα αερισμού τους. Οι κύριες βιολογικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι στις αναερόβιες λίμνες είναι ο σχηματισμός οξέων και η ζύμωση μεθανίου. Τυπικά οι αναερόβιες λίμνες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία δυνατών βιομηχανικών και γεωργικών αποβλήτων ή αποτελούν ένα στάδιο προεπεξεργασίας. Δεν έχουν εκτεταμένη χρήση στην επεξεργασία οικιακών λυμάτων. [5]

1.5.5 Υγροβιότοποι (Wetlands)

Οι υγροβιότοποι είναι τμήματα εδάφους κατακλυζόμενα με νερό συνήθως μικρού βάθους (<0,6 m) στα οποία αναπτύσσονται φυτά όπως είναι: διάφορα είδη κύπερης (φυτά της οικογένειας *Cyperaceae*, κυρίως του γένους *Carex spp.*), καλάμια (φυτά του γένους *Phragmites*, κυρίως του είδους *P.communis*) είδη βούρλων (φυτά του γένους *Scirpus*) και άλλα όπως είναι είδη ψαθιού και αφράτου (φυτά του γένους *Typha*). Η φυτική βλάστηση προσφέρει το βασικό υπόστρωμα ανάπτυξης των βακτηριακών μεμβρανών, βοηθά στο φιλτράρισμα και την προσρόφηση συστατικών του αποβλήτου, μεταφέρει οξυγόνο στη μάζα νερού και περιορίζει την ανάπτυξη αλγών με τον έλεγχο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων έχουν χρησιμοποιηθεί οι τεχνητοί, όσο και οι φυσικοί υγροβιότοποι.

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, που βασίζεται στη χρησιμοποίηση φυτών που αναφύονται όπως νεροκάλαμα, βούρλα και ψαθί. Σε τέτοια συστήματα, η εφαρμογή του αποβλήτου διενεργείται πάνω ή κάτω από την επιφάνεια εδάφους. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν όλες τις δυνατότητες των φυσικών υγροβιότοπων, αλλά χωρίς τους περιορισμούς, που αφορούν τη διάθεση εκροών σε φυσικά οικοσυστήματα. Για την περαιτέρω επεξεργασία προεπεξεργασμένων υγρών αποβλήτων με συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί δύο τύποι: α) Αυτά της ελεύθερης επιφάνειας (FWS) και β) τα υποεπιφανειακής ροής (SFS).

Φυσικοί υγροβιότοποι

Από μια κανονιστική άποψη οι φυσικοί υγροβιότοποι μπορούν να θεωρηθούν ως υδατικοί αποδέκτες. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις, που οι φυσικοί υγροβιότοποι δέχονται εκροές δευτεροβάθμιας ή προωθημένης επεξεργασίας, πληρούν κανονιστικές απαιτήσεις. Επιπλέον, το κύριο αντικείμενο χρησιμοποίησης φυσικών υγροβιότοπων ως αποδεκτών εκροών επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, είναι η ενίσχυση προϋπάρχοντος εθίμου. Τροποποιήσεις σε υπάρχοντες υγροβιότοπους με σκοπό τη βελτίωση των συνθηκών επεξεργασίας πρέπει γενικά να αποφεύγονται, γιατί μπορεί να προξενήσουν προβλήματα στο φυσικό οικοσύστημα.

Συστήματα υποεπιφανειακής ροής (SFS)

Τα συστήματα τύπου (SFS) σχεδιάζονται με σκοπό την επίτευξη δευτεροβάθμιας ή προωθημένης επεξεργασίας. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται επίσης συστήματα «ριζόσφαιρας» ή «φίλτρων εδάφους-καλαμιών» και αναπτύσσονται μέσα σε κανάλια ή τάφρους με σχετικά στεγανούς πυθμένες που περιέχουν άμμο ή άλλα γήινα μέσα υποστήριξης της αναπτυσσόμενης (επιφανειακά) φυτικής βλάστησης.

Στα συστήματα αυτά η επιφάνεια του νερού διατηρείται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή του χρησιμοποιούμενου μέσου. Η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου οφείλεται σε φυσικές και βιοχημικές αποκρίσεις του μέσου, καθώς επίσης στην επαφή του με το ριζικό σύστημα των φυτών. Τα επίπεδα απομάκρυνσης των ρυπαντών είναι ισοδύναμα των συστημάτων FWS και παρουσιάζουν μειωμένα προβλήματα, σχετικά με την ανάπτυξη κουνουπιών και δυσάρεστων οσμών. Για την κατασκευή των υποστρωμάτων χρησιμοποιείται κυρίως έδαφος, άμμος και διάφορα άλλα χονδρόκοκκα ή ακόμη και πλαστικά ή άλλα αδρανή υλικά.

Η απομάκρυνση BOD και στερεών συστατικών σε αιώρηση διενεργείται με διήθηση, καθίζηση και αποδόμηση από αερόβιους και αναερόβιους μικροοργανισμούς. Η απομάκρυνση του αζώτου σε τέτοια συστήματα, διενεργείται με τους μηχανισμούς νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Η απομάκρυνση του φωσφόρου εξαρτάται, κυρίως, από το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα. Η απομάκρυνση μετάλλων ποικίλλει και επιτυγχάνεται, κυρίως, με κατακρήμνιση και προσρόφησή τους. Τέλος η απομάκρυνση των παθογόνων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του υποστρώματος και την ταχύτητα ροής [3].

Συστήματα επιφανειακής ροής (FWS)

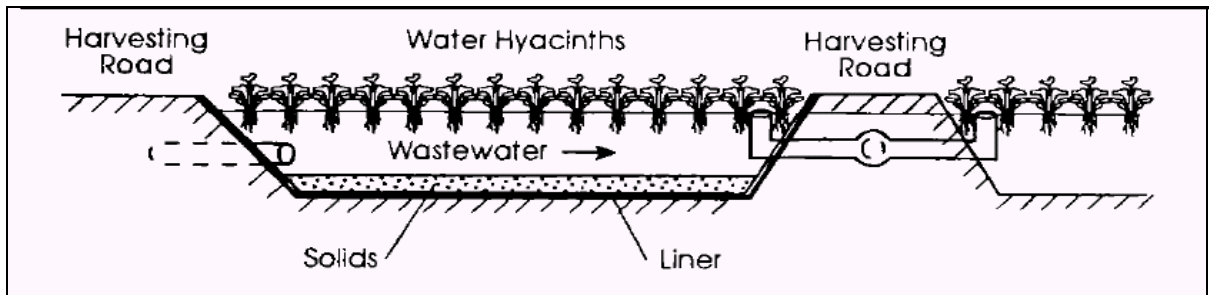
Τα συστήματα επιφανειακής ροής FWS αποτελούνται, συνήθως, από παράλληλες λεκάνες, κανάλια ή τάφρους με αδιαπέρατους πυθμένες, με αναφυόμενη φυτική βλάστηση και μικρό βάθος νερού (0,1-0,6 m). Σε τέτοια συστήματα εφαρμόζονται συνεχώς προεπεξεργασμένα απόβλητα και η περαιτέρω επεξεργασία τους διενεργείται, καθώς η εφαρμοζόμενη εκροή του ρέει με μικρή ταχύτητα δι μέσου των στελεχών και ριζωμάτων της υφιστάμενης φυτικής βλάστησης και του υφιστάμενου υποστρώματος. Επίσης, τα συστήματα αυτά μπορούν να σχεδιάζονται με σκοπό τη δημιουργία νέων εθίμων και την ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για την αποδοχή υδροβιότοπων ή ενίσχυση υφιστάμενων φυσικών υδροβιότοπων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, αναπτύσσεται ένας συνδυασμός υδατικών επιφανειών, με βλάστηση και ανοικτών και μικρών νησίδων με την κατάλληλη βλάστηση και ενίσχυση της ροής του νερού με αναζωογόνηση των υφιστάμενων εθίμων.

Στα συστήματα FWS κύρια πηγή οξυγόνου είναι η ελεύθερη επιφάνειά του, αλλά η ύπαρξη βιολογικής βλάστησης παρεμποδίζει το τον επιφανειακό επαναερισμό, που είναι δυνατό να διενεργείται με τον άνεμο. Γι' αυτό θα πρέπει να εφαρμόζονται μικρά οργανικά φορτία. Αντίθετα, η ύπαρξη επιδρά ανασταλτικά στην ανάπτυξη αλγών. Η απομάκρυνση στερεών σε αιώρηση οφείλεται κυρίως στο μηχανισμό της καθίζησης και διενεργείται, κυρίως, σε μικρές αποστάσεις από το σημείο εισροής του αποβλήτου στο σύστημα. Η απομάκρυνση του αζώτου οφείλεται, κυρίως, στις διεργασίες νιτροποίησης-απονιτροποίησης και λιγότερο στην πρόσληψή του από τα φυτά και γι' αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα εφαρμογής του οργανικού φορτίου και το χρόνο συγκράτησης. Ακόμη και όταν τα φυτά που χρησιμοποιούνται συγκομίζονται περιοδικά, η απομάκρυνση του αζώτου η οφειλόμενη στην πρόσληψή του από τα φυτά, αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό 10-15% της συνολικής απομάκρυνσής του. Τέλος, η απομάκρυνση του φωσφόρου σε τέτοια συστήματα είναι περιορισμένη, εξαιτίας της περιορισμένης επαφής του αποβλήτου με το έδαφος.

1.5.6 Συστήματα επιπλέοντων υδροχαρών φυτών (Floating aquatic plant systems)

Τα συστήματα επιπλέοντων υδροχαρών φυτών ομοιάζουν στη βασική τους σύλληψη με αυτά των υδροβιότοπων ελευθέρως επιφανείας με τη διαφορά ότι τα χρησιμοποιούμενα φυτά είναι επιπλέοντα είδη, όπως είναι ο υάκινθος του νερού (*Eichhornia crassipes*) και διάφορα είδη της οικογένειας *Lemnaceae*. Σ' αυτά τα συστήματα το βάθος του νερού είναι συνήθως μεγαλύτερο από αυτό των συστημάτων

των τεχνητών υγροβιότοπων ελεύθερης επιφάνειας και συνήθως κυμαίνεται από 0,5 ως 1,8 m. Επίσης, σ' αυτά τα συστήματα εφαρμόζεται συνήθως συμπληρωματικός αερισμός για την αύξηση της ικανότητας επεξεργασίας και τη διατήρηση αερόβιων συνθηκών και βιολογικού ελέγχου της ανάπτυξης κουνουπιών. Τέτοια επιπλέοντα υδροχαρή φυτά έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση αλγών από εκροές λιμνών σταθεροποίησης. Τα συνήθη υδραυλικά φορτία και η ειδική έκταση των συστημάτων επεξεργασίας με επιπλέοντα υδροχαρή φυτά είναι ισοδύναμα των αντιστοίχων συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων.



Σχήμα 1.2 - Σύστημα επιπλέοντων υδροχαρών φυτών

1.5.7 Υδατοκαλλιέργεια

Υδατοκαλλιέργεια είναι η ανάπτυξη ψαριών και άλλων υδρόβιων οργανισμών σε εκροές υγρών αποβλήτων για την παραγωγή πηγών φυτικών τροφών και κυρίως βιομάζας. Σε διάφορες χώρες, τα υγρά απόβλητα έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλαπλές περιπτώσεις υδατοκαλλιέργειών. Στις περισσότερες, όμως, περιπτώσεις το κύριο αντικείμενο τέτοιων συστημάτων ήταν η παραγωγή βιομάζας και η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου αποτελούσε επί μέρους ή δευτερεύοντα σκοπό. Η επιτυγχανόμενη με τέτοια συστήματα επεξεργασία οφείλεται εξ ολοκλήρου στα βακτήρια που αναπτύσσονται και εγκαθίστανται στα επιπλέοντα υδροχαρή φυτά. Γενικά, ο συνδυασμός της υδατοκαλλιέργειας και της επεξεργασίας του υγρού αποβλήτου, ως μιας ενιαίας λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, απαιτεί περαιτέρω έρευνα. Ιδιαίτερα, θα πρέπει να καθορισθεί η επικινδυνότητα για τη δημόσια υγεία, που μπορεί να οφείλεται στους υδρόβιους οργανισμούς που αναπτύσσονται σε τέτοια συστήματα [3].

1.6 Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρυπαντών

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία του αποβλήτου στους τεχνητούς υγροβιότοπους είναι όμοιες με αυτές που συμβαίνουν στα φυσικά οικοσυστήματα. Η αποδόμηση της οργανικής ύλης μπορεί να προκύψει είτε μέσω αερόβιων είτε μέσω αναερόβιων διεργασιών. Η ισορροπία μεταξύ των διεργασιών αυτών εξαρτάται από το οργανικό φορτίο καθώς και από την παροχή οξυγόνου. Το οργανικό φορτίο προέρχεται κυρίως από την εισροή του αποβλήτου. Η παροχή του οξυγόνου γίνεται μέσω της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και των αλγών που είναι προσκολλημένα στην επιφάνεια των αναδυόμενων φυτών. Σαν συνέπεια των παραπάνω, οι διεργασίες στη στήλη του νερού είναι αερόβιες κατά τη διάρκεια της μέρας, ενώ γίνονται αναερόβιες τη νύχτα.

Η παροχή οξυγόνου στα ιζήματα του υγροβιότοπου είναι αρκετά χαμηλή και έτσι οι διεργασίες εκεί είναι κυρίως αναερόβιες. Παρόλα αυτά από τις ρίζες των φυτών διαρρέεται κάποια ποσότητα οξυγόνου. Όπου η πυκνότητα των ριζών είναι υψηλή η διαρροή αυτή συνεισφέρει στην παροχή οξυγόνου και στα επιφανειακά στρώματα εδάφους. Σε σύγκριση όμως με το BOD του αποβλήτου η ροή οξυγόνου από τις ρίζες είναι μικρή και δεν είναι ο κύριος μηχανισμός αποδόμησης των φορτίων του άνθρακα. Η παραγωγή οξυγόνου από τη φυτική ριζόσφαιρα μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική σε άλλες διεργασίες όπως αυτή της νιτροποίησης.

Πολλοί από τους μηχανισμούς επεξεργασίας είναι τουλάχιστον μερικώς διαδοχικοί. Για παράδειγμα σε απλές μικροβιακές καλλιέργειες, το μεγαλύτερο μέρος του BOD αποδομείται πριν ξεκινήσει η νιτροποίηση. Ένα από τα πλεονεκτήματα ενός πιο περίπλοκου συστήματος επεξεργασίας, όπως το σύστημα ενός τεχνητού υγροβιότοπου, είναι, ως ένα σημείο, ότι αυτοί οι διαδοχικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης μπορούν να συμπιεστούν στο χώρο και στο χρόνο. Παρακάτω ακολουθεί μια πιο λεπτομερής ανάλυση των μηχανισμών απομάκρυνσης κάθε ρυπαντή.

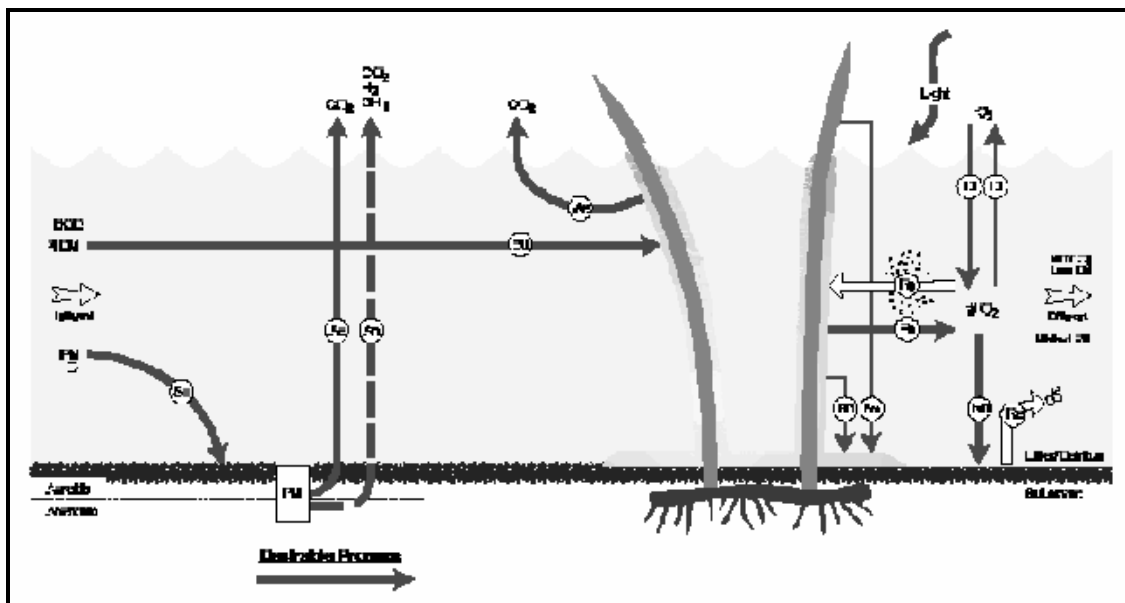
1.6.1 Απομάκρυνση BOD/ άνθρακα

Το διαλυμένο ή σε αιώρηση BOD απομακρύνεται με διάφορους μηχανισμούς στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Το διαλυτό BOD απομακρύνεται με την βιολογική δραστηριότητα και την προσρόφησή του στα φυτά και στην επιφάνεια των υποστρωμάτων και στη στήλη του νερού. Οι χαμηλές ταχύτητες και τα αναφυόμενα φυτά διευκολύνουν τη συσσωμάτωση, καθίζηση και την παγίδευση του BOD σε αιώρηση. [3]

Ένας τεχνητός υγροβιότοπος έχει μια ποικιλία πηγών ή φορτίων άνθρακα. Το απόβλητο που εισρέει αντιπροσωπεύει το κύριο φορτίο άνθρακα. Υπάρχουν όμως και άλλες σημαντικές πηγές άνθρακα από την ανάπτυξη της φυτικής βλάστησης και από την ανάπτυξη της βιομάζας των μικροοργανισμών.

Η φύση των πηγών του άνθρακα διαφέρει. Παραδείγματος χάριν, ο οργανικός άνθρακας στα αστικά απόβλητα μπορεί να είναι εύκολα βιοαποικοδομήσιμος και δημιουργεί άμεσα υψηλό BOD. Αντίθετα τα υπολείμματα των φύλλων που πέφτουν από τα φυτά είναι δύσκολα βιοαποικοδομήσιμα και διασπώνται αργά.

Οι μηχανισμοί αποσύνθεσης του φορτίου του άνθρακα καθορίζεται από μια ισορροπία μεταξύ του φορτίου του άνθρακα και της παροχής οξυγόνου. Το οξυγόνο διοχετεύεται στη στήλη νερού του υγροβιότοπου με διάχυση από τον ατμοσφαιρικό αέρα μέσω της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτών στη στήλη νερού. Αν η παροχή οξυγόνου ικανοποιεί την απαίτηση σε οξυγόνο, η αποικοδόμηση του BOD προκύπτει με αερόβιες διεργασίες. Αν η απαίτηση σε οξυγόνο είναι μεγαλύτερη από την παροχή οξυγόνου, η αποικοδόμηση γίνεται με αναερόβιες διεργασίες. Η ισορροπία μεταξύ του αερόβιου και αναερόβιου μεταβολισμού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις διόδους απομάκρυνσης του άνθρακα σε έναν υγροβιότοπο. Στα περισσότερα συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων και οι δυο διεργασίες μπορούν να φέρουν αποτελέσματα. Η αποικοδόμηση της οργανικής ύλης προκύπτει και στα ιζήματα και στο στρώμα των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται στη φυτική βλάστηση [6].



Σχήμα 1.3 - Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών απομάκρυνσης του BOD (Sinclair Knight Merz, 2000)

1.6.2 Απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών

Τα ολικά αιωρούμενα στερεά των υγρών αποβλήτων αποτελούνται από μια ποικιλία οργανικών και ανόργανων συστατικών. Η πυκνότητα και το μέγεθος των σωματιδίων διαφέρουν αξιοσημείωτα. Σωματίδια διαφορετικού μεγέθους και πυκνότητας απομακρύνονται με διαφορετικούς μηχανισμούς.

Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης των ολικών αιωρούμενων στερεών είναι η συσσωμάτωση και η καθίζηση στο κυρίως υγρό, και η φίλτρανση στα διάκενα του υποστρώματος. Τα περισσότερα από τα στερεά που έχουν καθιζάνει απομακρύνονται στα 50 με 100 ft από το σημείο εφαρμογής. Η ιδανική απομάκρυνση στερεών απαιτεί τη διευκόλυνση της φίλτρανσης και της καθίζησης από τη βλάστηση και την αποφυγή επανεμφάνισης αλγών. Τα στερεά που προέρχονται από άλγη απαιτούν 6 με 10 μέρες χρόνο συγκράτησης έτσι ώστε να απομακρυνθούν.

Τα μεγαλύτερα και βαρύτερα σωματίδια κατακάθονται στη ζώνη του υδροβιότοπου που εισρέει το απόβλητο. Ελαφρότερα και μικρότερα σωματίδια κατακάθονται με τη βοήθεια της φυτικής βλάστησης. Η φυτική βλάστηση του υδροβιότοπου προωθεί την κατακάθιση μειώνοντας την ανάμιξη της στήλης νερού και την επαναιώρηση των σωματιδίων. Τα μικρότερα σωματίδια (βακτήρια, άργιλοι, κολλοειδή κ.λ.π.) δε συσσωματώνονται ώστε να κατακαθίσουν όσο βρίσκονται στον υδροβιότοπο. Για τα σωματίδια αυτά ο μοναδικός μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η προσκόλλησή τους σε επιφάνειες στη στήλη νερού. Οι επιφάνειες αυτές είναι οι επιφάνειες των φυτών καθώς και οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται πάνω σε αυτά [6].

Καθίζηση

Η διαδικασία της καθίζησης εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος του σωματιδίου που καθιζάνει, τη βαρύτητα και το ιξώδες. Η καθίζηση λαμβάνει χώρα τόσο από μεμονωμένα σωματίδια, όσο και από συσσωματωμένα σωματίδια. Η αντίσταση που επηρεάζει την ταχύτητα καθίζησης εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου την τύρβη και το ιξώδες. Όσον αφορά στα σωματίδια που έχουν προκύψει από συσσωματώσεις, η ταχύτητα καθίζησης αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς η μάζα τους μεγαλώνει συνεχώς. Η συσσωμάτωση λαμβάνει χώρα είτε εξαιτίας φυσικών διεργασιών, είτε εξαιτίας της χημικής προσρόφησης. Ο σχηματισμός ολοένα και μεγαλύτερων σωματιδίων εξαρτάται από την ηλεκτρική φόρτιση στην επιφάνεια της συσσώρευσης. Ποσότητα διαλυμένης ύλης μπορεί να προσροφηθεί στη σωματιδιακή επιφάνεια ως

αποτέλεσμα διάφορων μηχανισμών συγκράτησης, οι οποίοι έχουν σαν αποτέλεσμα την αποσταθεροποίηση των σωματιδίων και συνεπώς τη σωματιδιακή συσσωμάτωση.

Φίλτρωση/ Συγκράτηση

Η απομάκρυνση εξαιτίας της φίλτρωσης δεν είναι σημαντική στους υδροβιότοπους επιφανειακής ροής. Το σώμα των αναφυόμενων φυτών και των φυτικών καταλοίπων δεν παγιδεύει σε μεγάλο βαθμό τα σωματίδια της εισροής. Η συγκράτηση όμως και η συγκόλληση των σωματιδίων στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης αποτελεί σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης. Η αποτελεσματικότητα του μηχανισμού αυτού εξαρτάται από το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, την ταχύτητα ροής και την επιφάνεια της φυτικής βλάστησης στην οποία προσκρούουν τα σωματίδια. Η επιφάνεια της φυτικής βλάστησης καλύπτεται σταδιακά με ένα στρώμα μικροοργανισμών το οποίο προσροφά κολλοειδή ή υπερκολλοειδή σωματίδια και απορροφά διαλυμένα μόρια. Ανάλογα με τη φύση των στερεών αυτά μπορούν να μεταβολιστούν και να μετατραπούν σε διαλυτά σωματίδια, αέρια και βιομάζα ή μπορούν να προσκολληθούν φυσικά στην επιφάνεια του στρώματος αυτού και να αποδεσμευτούν στη στήλη νερού [7].

Επαναιώρηση

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής ροής η φυσική επαναιώρηση δεν είναι κυρίαρχη διεργασία. Οι ταχύτητες του νερού είναι συνήθως πολύ μικρές για να προκαλέσουν την αιώρηση σωματιδίων που έχουν ήδη καθιζάνει. Η πιθανότητα ύπαρξης διαβρωτέων ταχυτήτων βρίσκεται μόνο σε περιπτώσεις υδροβιότοπων με μεγάλο λόγο μήκους ανά πλάτος που λαμβάνουν μεγάλα φορτία.

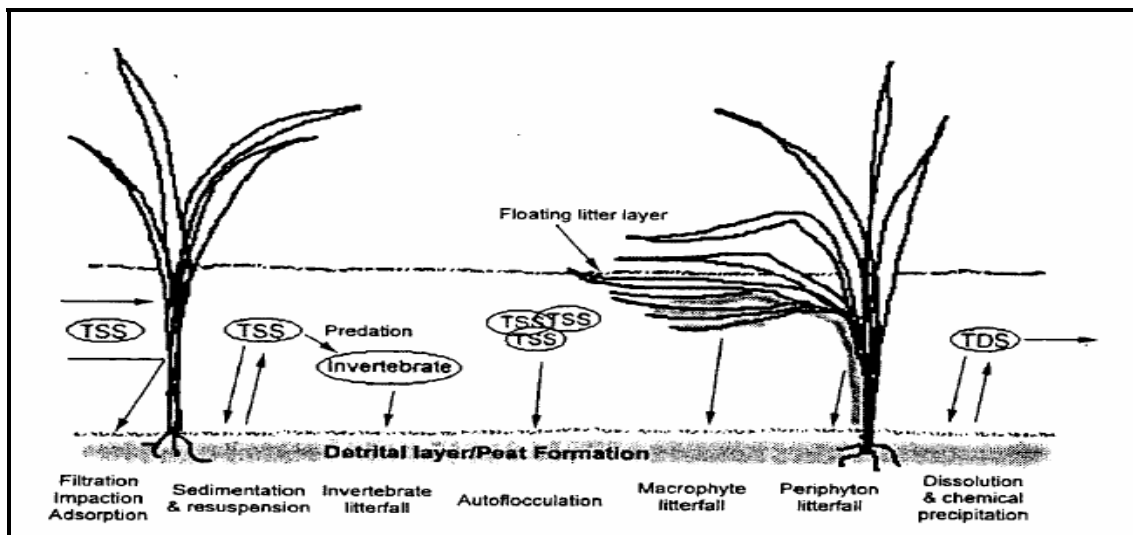
Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί που μπορούν να προκαλέσουν επαναιώρηση σε υδροβιότοπους επιφανειακής ροής : η τύρβη που δημιουργείται από τον άνεμο, η διατάραξη που προκαλεί η πανίδα του συστήματος και η επίπλευση που προκαλείται από την παραγωγή αερίων. Σε ανοικτές επιφάνειες νερού ο άνεμος προκαλεί επιφανειακή ροή κατά τη κατεύθυνση του ανέμου και ροή στο βυθό του υδροβιότοπου με αντίθετη κατεύθυνση.

Πολλά ζώα διάφορων ειδών και μεγεθών μπορούν να προκαλέσουν επαναιώρηση των ιζημάτων σε ένα υδροβιότοπο. Παραδείγματα τέτοιων ζώων που έχουν παρατηρηθεί είναι ψάρια όπως κυπρίνοι και ψάρια του γένους *alosa*. Η επαναιώρηση μέσω των αερίων που παράγονται στο σύστημα προκύπτει όταν τα αέρια αυτά παγιδεύονται ή

ενσωματώνονται στα σωματίδια του ιζήματος. Τα αέρια που παράγονται από το σύστημα είναι κυρίως το οξυγόνο που παράγεται με τη φωτοσύνθεση και η παραγωγή μεθανίου στις αναερόβιες ζώνες.

Σε υδροβιότοπους που είναι πλήρως καλυμμένοι με βλάστηση, το στρώμα των υπολειμμάτων και το ριζικό σύστημα της βλάστησης εξασφαλίζουν τη σταθεροποίηση των ιζημάτων και του εδάφους. Το γεγονός αυτό περιορίζει, αλλά δεν εξαλείφει το πρόβλημα της επαναιώρησης [4].

Η ποσότητα TSS στην εκροή του υδροβιότοπου συνήθως αποτελείται από στερεά τα οποία δημιουργούνται εντός του συστήματος και σπάνια από σωματίδια τα οποία δεν μπορούν να απομακρυνθούν από την εισροή. Για το λόγο αυτό οι συγκεντρώσεις των TSS στην εκροή δεν μπορούν να είναι μηδενικές, κυμαίνονται όμως κοντά στις ελάχιστες συγκεντρώσεις που παράγονται από το σύστημα (συγκεντρώσεις υποβάθρου). Οι συγκεντρώσεις υποβάθρου κυμαίνονται από 2 έως 10 mg/L [7].



Σχήμα 1.4 - Περιγραφή μηχανισμών απομάκρυνσης και επαναιώρησης TSS (EPA, 1999)

1.6.3 Απομάκρυνση Αζώτου

Η απομάκρυνση του αζώτου στους τεχνητούς υδροβιότοπους επιτυγχάνεται με νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Η πρόσληψή του από τα φυτά αντιπροσωπεύει περίπου το 10% της συνολικής απομάκρυνσης του αζώτου. Η νιτροποίηση και απονιτροποίηση είναι μικροβιακές αντιδράσεις που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το χρόνο συγκράτησης. Οι οργανισμοί για την νιτροποίηση απαιτούν οξυγόνο και επαρκής επιφάνεια να αναπτυχθούν και γι' αυτό δεν είναι παρόντες σε μεγάλους αριθμούς, είτε

όταν το οργανικό φορτίο είναι ιδιαίτερα υψηλό είτε συστήματα σχετικά νέα με ατελής κάλυψη φυτικής βλάστησης [8].

Οργανικό άζωτο

Το οργανικό άζωτο, που περιέχεται στα αιωρούμενα στερεά των υγρών αποβλήτων, απομακρύνεται όπως αναφέρεται σε μεγάλο ποσοστό με διήθηση και φιλτράρισμα. Επίσης το οργανικό άζωτο, υπό τη μορφή στερεών συστατικών του αποβλήτου, που συνήθως περιέχεται σε πολύπλοκες μεγαλομοριακές ενώσεις, όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιγνίνη, μπορεί να ενσωματώνεται κατ' ευθείαν στην οργανική μάζα ή στο χούμο του εδάφους. Ένα ποσοστό του οργανικού αζώτου υδρολύεται σε διαλυτά αμινοξέα και μπορεί να υποστεί περαιτέρω διάσπαση κατά την οποία ελευθερώνεται ιονισμένο αμμώνιο (NH_4^+).

Αμμωνιακό άζωτο

Το αμμωνιακό άζωτο μπορεί να ακολουθεί διάφορους δίοδους απομάκρυνσης. Διαλυμένη αμμωνία μπορεί να απομακρυνθεί με εξάχνωσή της ως αέρια αμμωνία, κατ' ευθείαν στην ατμόσφαιρα. Το ποσοστό απομάκρυνσης με αυτή τη δίοδο είναι σχετικά μικρό (<10%). Το μεγαλύτερο ποσοστό εισερχόμενου και/ ή παραγόμενου αμμωνίου προσροφάται προσωρινά δια μέσου αντιδράσεων εναλλαγής ιόντων σε εδαφικά οργανικά και αργιλικά σωματίδια. Το προσροφημένο αμμώνιο είναι διαθέσιμο για πρόσληψή του από τα φυτά και μικροοργανισμούς ή για μετατροπή του σε νιτρικό άζωτο δια μέσου της βιολογικής νιτροποίησης. Επειδή το δυναμικό προσρόφησης του αμμωνίου σε φυσικά συστήματα είναι πεπερασμένο είναι απαραίτητη η νιτροποίησή του για περαιτέρω απελευθέρωσή του και αναγέννηση νέων περιοχών προσρόφησης [3].

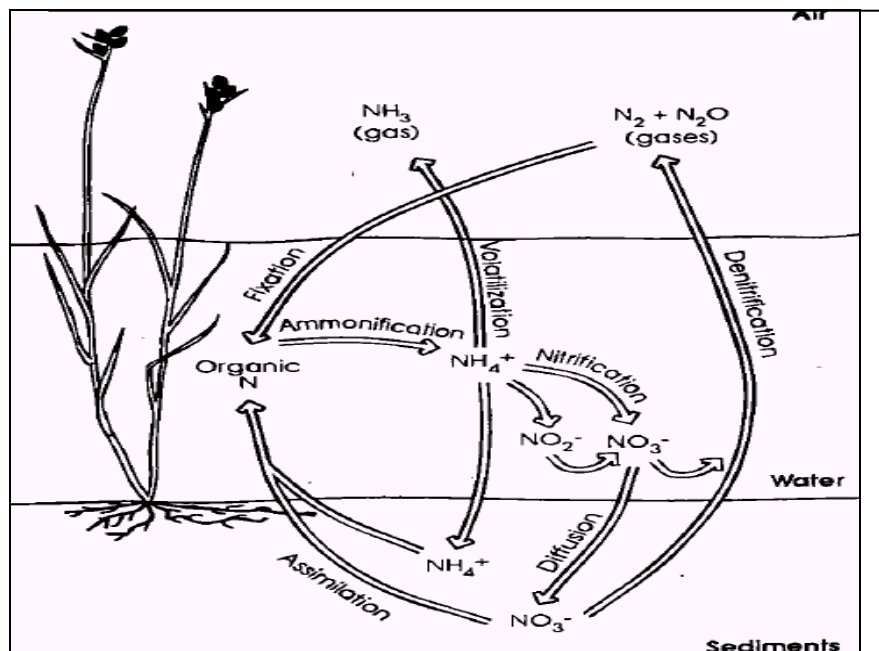
Βιολογική νιτροποίηση

Το αμμώνιο μπορεί, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, να δράσει και σαν υπόστρωμα για μικροβιακούς μετασχηματισμούς. Η νιτροποίηση είναι μια αερόβια οξείδωση του αμμωνίου σε νιτρικά. Μεγάλος αριθμός μικροοργανισμών που χρησιμοποιούν τον οργανικό άνθρακα σαν πηγή ενέργειας είναι ικανοί να παράγουν οξειδωμένες νιτρικές ενώσεις. Εν τούτοις η νιτροποίηση από αυτότροφους μικροοργανισμούς θεωρείται ο κύριος μηχανισμός μετατροπής του αμμωνίου σε νιτρικό άζωτο. Η νιτροποίηση είναι μια διεργασία που συντελείται σε δυο στάδια από μια ομάδα βακτηρίων. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την οξείδωση του αμμωνίου σε νιτρώδη, κυρίως από βακτήρια του γένους

Nitrosomas, ενώ το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την οξείδωση των νιτρωδών σε νιτρικά, κυρίως από βακτήρια του γένους *Nitrobacter*. Η απόδοση της νιτροποίησης εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων όπως η παροχή αμμωνίου, η παροχή οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα, η πυκνότητα του πληθυσμού των βακτηρίων, η θερμοκρασία, pH και αλκαλικότητα. Η παροχή οξυγόνου περιορίζει την νιτροποίηση στην επιφάνεια του βένθους όπου είναι δυνατή η παροχή οξυγόνου και στα φιλμ των μικροοργανισμών στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης [6].

Νιτρικό άζωτο

Το νιτρικό άζωτο φέρει αρνητικό φορτίο, δε συγκρατείται με αντιδράσεις εναλλαγής και συνήθως παραμένει σε διάλυση και μεταφέρεται με τη ροή του νερού. Το νιτρικό άζωτο προσλαμβάνεται από τα φυτά, αλλά η απομάκρυνσή του με αυτή τη διεργασία συμβαίνει μόνο στην περιοχή ανάπτυξης των ριζών και σε περιόδους ενεργούς φυτικής βλάστησης. Η κύρια απομάκρυνση από το σύστημα επιτυγχάνεται με τη συγκομιδή και απομάκρυνση από το σύστημα σημαντικού ποσοστού της παραγόμενης φυτικής βλάστησης. Αντίθετα, όταν η φυτική βλάστηση παραμένει στο σύστημα, το άζωτο που περιέχεται σε αυτήν επανεισάγεται στο σύστημα κυρίως ως οργανικό άζωτο.



Σχήμα 1.5 - Περιγραφή μηχανισμών απομάκρυνσης αζώτου

Βιολογική απονιτροποίηση

Το νιτρικό άζωτο απομακρύνεται επίσης με τη διεργασία της βιολογικής απονιτροποίησης και στη συνέχεια με τη διάχυσή του στην ατμόσφαιρα, κυρίως ως οξειδίου του αζώτου ή ως ελεύθερου αζώτου. Η απονιτροποίηση διενεργείται με επαμφοτερίζοντα βακτήρια υπό ανοξικές συνθήκες. Γι' αυτή τη διεργασία δεν είναι απαραίτητο να επικρατούν ανοξικές συνθήκες σε όλο το σύστημα. Έτσι απονιτροποίηση είναι δυνατό να συμβαίνει σε ανοξικές μικροπεριοχές, παρακείμενες σε ευρύτερες αερόβιες περιοχές. Για μεγιστοποίηση, όμως, της απονιτροποίησης θα πρέπει να βελτιστοποιούνται οι απαιτούμενες συνθήκες γι' αυτή τη διεργασία. Για την ολοκλήρωση της βιολογικής απονιτροποίησης, εντός των ανοξικών συνθηκών, απαιτείται και μια αυξημένη αναλογία άνθρακα/ αζώτου. Μια αναλογία άνθρακα/ αζώτου 2:1 είναι απαραίτητη. Βιομάζα από τη φυτική βλάστηση μπορεί να αποτελέσει μερική πηγή άνθρακα. Σε συστήματα όμως με υψηλά φορτία η πηγή άνθρακα θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στο απόβλητο. Έτσι σε συστήματα με εκροές δευτεροβάθμιας επεξεργασίας που έχουν αναλογία άνθρακα/ αζώτου <1 , δεν μπορεί να μεγιστοποιηθεί η απομάκρυνση αζώτου, χωρίς να ληφθούν πρόσθετα μέτρα [3].

1.6.4 Απομάκρυνση φωσφόρου

Ο φώσφορος στα φυσικά νερά και στα υγρά απόβλητα συναντάται κυρίως υπό τη μορφή φωσφορικών. Τα φωσφορικά ταξινομούνται σε ορθοφωσφορικά, συμπυκνωμένα (πυρο- μετα-, και πολύ-) φωσφορικά και οργανικά δεσμευμένα φωσφορικά και εμφανίζονται στο σύστημα τόσο σε σωματιδιακή μορφή, όσο και σε διαλυτή μορφή. Ο φώσφορος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία των οικοσυστημάτων. Συχνά αποτελεί το κυριότερο περιοριστικό θρεπτικό σε υδάτινα οικοσυστήματα. Έχει συνήθως την τάση να συσσωρεύεται στο ίζημα των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας και με αυτό τον τρόπο απομακρύνεται. Η επαύξηση των ανόργανων φωσφορικών και της βιομάζας στο ίζημα αποτελεί τον κυριότερο μηχανισμό απομάκρυνσης του φωσφόρου σε ένα σύστημα επεξεργασίας τεχνητού υδροβιότοπου επιφανειακής ροής.

Φυσικοί – χημικοί διαχωρισμοί

Τα φωσφορικά που βρίσκονται υπό τη μορφή σωματιδίων μπορούν να εναποτεθούν στον πυθμένα του υδροβιότοπου μέσω της καθίζησης ή να παγιδευτούν στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης και να δεσμευτούν από το στρώμα των μικροοργανισμών. Τα διαλυμένα φωσφορικά μπορούν να δεσμευτούν από τα στρώματα των μικροοργανισμών

που βρίσκονται στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης και στα κατάλοιπά της που επιπλέουν, ή που βρίσκονται στο ίζημα. Η ανταλλαγή των διαλυμένων φωσφορικών ανάμεσα στο νερό που είναι εγκλωβισμένο στους πόρους και στην υδάτινη στήλη διαμέσου της διάχυσης ή της ρόφησης/ εκρόφησης αποτελεί τη κύρια πηγή των διαλυμένων φωσφορικών. Στο εγκλωβισμένο, στους πόρους, νερό του ιζήματος τα φωσφορικά αυτά μπορούν να κατακρημνιστούν ως αδιάλυτα σιδηρούχα, ασβεστούχα και αλουμινούχα φωσφορικά ή να προσροφηθούν σε σωματίδια ιλύος, οργανική τύρφη και σιδηρούχα και αλουμινούχα οξείδια και υδροξείδια. Τα φωσφορικά μπορούν να απελευθερωθούν από τα μεταλλικά σύμπλοκα ανάλογα με το οξειδοαναγωγικό δυναμικό του συστήματος. Επίσης, τα φωσφορικά απελευθερώνονται από τα σιδηρούχα και αλουμινούχα σύμπλοκα με υδρόλυση η οποία λαμβάνει χώρα κάτω από ανοξικές συνθήκες. Τα ροφημένα φωσφορικά στα σωματίδια ιλύος και ένυδρα οξείδια μπορούν επίσης να επιστρέψουν στην υδάτινη στήλη μέσω της ανταλλαγής ιόντων. Αν το pH του συστήματος μειωθεί, ως αποτέλεσμα του βιολογικού σχηματισμού οργανικών οξέων, νιτρικών ή θεικών, κάποια ποσότητα φωσφορικών μπορεί να εκλυθεί. Με την πάροδο του χρόνου ένα σημαντικό μέρος των φωσφορικών που έχουν απομακρυνθεί, δεσμεύεται στο ίζημα και με αυτό τον τρόπο απομακρύνεται από το σύστημα. Κατά την αρχική περίοδο προσαρμογής ενός συστήματος FWS μέχρις ότου αυτό σταθεροποιηθεί παρατηρείται μεγάλου βαθμού απομάκρυνση λόγω των αρχικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στον πυθμένα του υδροβιότοπου.

Βιολογικοί μετασχηματισμοί φωσφορικών

Τα διαλυμένα οργανικά φωσφορικά και τα μη διαλυμένα οργανικά και ανόργανα φωσφορικά δεν είναι συνήθως διαθέσιμα για τη βλάστηση μέχρις ότου μετασχηματιστούν σε διαλυτή ανόργανη μορφή. Οι μετασχηματισμοί αυτοί πραγματοποιούνται στη στήλη του νερού από αιωρούμενους μικροοργανισμούς, από τα στρώματα των μικροοργανισμών στην επιφάνεια των φυτών και στα ιζήματα. Η λήψη από τους μικροοργανισμούς αποτελεί ένα γρήγορο κυκλικό μηχανισμό. Με το θάνατο και την αποσύνθεση της βλάστησης η μεγαλύτερη ποσότητα των φωσφορικών επιστρέφει πίσω στην υδάτινη στήλη, ενώ κάποια ποσότητα απομακρύνεται στα καινούρια σχηματιζόμενα ιζήματα. Η λήψη φωσφορικών από τα μακρόφυτα πραγματοποιείται μέσω του ριζικού συστήματος. Η λήψη πραγματοποιείται κατά την περίοδο ανάπτυξης της βλάστησης ενώ κάποια ποσότητα φωσφορικών αποδεσμεύεται κατά τη γήρανση των φυτών κατά το τέλος του καλοκαιριού ή το φθινόπωρο, συνοδευόμενη από την αποσύνθεση των φυτικών κατάλοιπων.

Η μορφή των φωσφορικών, ο τύπος και η πυκνότητα της φυτικής βλάστησης, ο ρυθμός υδραυλικού φορτίου των φωσφορικών και οι κλιματικές συνθήκες καθορίζουν τον τύπο και την ποσότητα των φωσφορικών που απομακρύνονται από το σύστημα σε κάποια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η απομάκρυνση των φωσφορικών δια μέσου των φυτών λαμβάνει χώρα εποχιακά, καθώς κατά την περίοδο γήρανσης των φυτών, η μεγαλύτερη ποσότητα φωσφορικών που έχει απομακρυνθεί, ελευθερώνεται πίσω στην υδάτινη στήλη.

Συνήθως σε υδροβιότοπους επεξεργασίας οι ευκαιρίες επαφής μεταξύ των υγρών αποβλήτων και του εδάφους είναι περιορισμένες, ενώ η απομάκρυνση της βλάστησης δεν πραγματοποιείται με ιδιαίτερα εύκολο τρόπο. Αποτελεσματική απομάκρυνση του φωσφόρου παρατηρείται ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των πρώτων 12- 24 μηνών. Όταν όλο το σύστημα φτάσει σε ένα επίπεδο ισορροπίας, η απομάκρυνση του φωσφόρου μειώνεται. Σε γενικές γραμμές με βάση διάφορες εκτιμήσεις και έρευνες, η ετήσια απομάκρυνση φωσφόρου από συστήματα FWS παρουσιάζεται περιορισμένη. Μια απομάκρυνση ολικού φωσφόρου (TP) 30 – 50% πραγματοποιείται συνήθως σε υδροβιότοπους με χρόνο συγκράτησης <10 μέρες. Σε κάποια συστήματα FWS με χρόνους παραμονής > 20 μέρες παρατηρήθηκαν εκροές < 4 mg/L με εισροή > 10 mg/L. Απαιτείται μεγάλη έκταση και επιπρόσθετη επεξεργασία για μεγάλου βαθμού απομάκρυνση του φωσφόρου σε τυπικά συστήματα υδροβιότοπων [7].

1.6.5 Απομάκρυνση παθογόνων οργανισμών

Οι παθογόνοι οργανισμοί που εισέρχονται σε ένα τεχνητό υδροβιότοπο μπορεί να είναι ενσωματωμένα στα ολικά αιωρούμενα στερεά ή μπορεί να αιωρούνται στην εισροή του αποβλήτου. Αυτοί που είναι ενσωματωμένοι στα ολικά στερεά απομακρύνονται με τους ίδιους μηχανισμούς που απομακρύνονται και τα TSS. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν αναλυθεί παραπάνω και είναι η καθίζηση, η φίλτρανση και η ρόφηση. Αφού διαχωριστούν από τη στήλη νερού, οι ζωντανοί μικροοργανισμοί διαχωρίζονται από τη στήλη νερού μπορούν να αποδεσμευτούν και να συγκρατηθούν στα στρώματα των μικροοργανισμών ή στους πόρους των ιζημάτων που περιέχουν νερό, ή να εισέλθουν ξανά στη στήλη νερού. Ανεξάρτητα από το πού θα βρεθούν, πρέπει να ανταγωνιστούν με το σύνολο των οργανισμών που τους περιβάλλουν. Σαν εντερικοί οργανισμοί, συνήθως απαιτούν πλούσιο υπόστρωμα και υψηλές θερμοκρασίες. Οι περισσότεροι δεν μπορούν να επιζήσουν τον ανταγωνισμό αυτό. Οι περισσότεροι θα καταστραφούν σαν θηράματα άλλων οργανισμών ή από την ακτινοβολία UV, αν βρεθούν κοντά στην επιφάνεια του νερού.

Η απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών στους υγροβιότοπους φαίνεται να έχει άμεση σχέση με την απομάκρυνση των ολικών αιωρούμενων στερεών και το χρόνο συγκράτησης. Έχουν διεξαχθεί λίγες μελέτες για την επίδραση των τεχνητών υγροβιότοπων στους παθογόνους μικροοργανισμούς. Ο Gearheart βρήκε παρόμοια απομάκρυνση εισροές μολυσμένες με σαλμονέλα και κολοβακτηρίδια MS2. Πολλοί παθογόνοι μικροοργανισμοί είναι πιο ευαίσθητοι στο περιβάλλον των υγροβιότοπων από ότι οι οργανισμοί που χρησιμοποιούνται σα δείκτες, όπως τα βακτήρια *E.coli* και οι στρεπτόκοκκοι. Μερικοί όμως ιοί και πρωτόζωα μπορεί να είναι πιο ανθεκτικοί. Μεμονωμένα αποτελέσματα που αφορούν σε ιούς έχουν καταγραφεί, και οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την απομάκρυνσή τους είναι διαφορετικοί από αυτούς που καταστρέφουν τους δείκτες.

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι παθογόνοι μικροοργανισμοί μπορούν να αναπτυχθούν μέσα στον υγροβιότοπο. Επίσης τέτοιοι οργανισμοί μπορούν να βρεθούν ακόμα και στους φυσικούς υγροβιότοπους. Η ποσότητα αυτή των μικροοργανισμών μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την εποχή και άλλες λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος. Θα έπρεπε επίσης να αναφερθεί ότι γενικά οι μικροοργανισμοί δεν προέρχονται πάντα από ανθρώπινες πηγές. Παρόλα αυτά οι εκροές των τεχνητών υγροβιότοπων όσον αφορά στους παθογόνους οργανισμούς είναι απίθανο να βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων από την νομοθεσία. Γι αυτό απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για τη διάθεσή τους στο περιβάλλον [9].

1.6.6 Απομάκρυνση μετάλλων

Παρόλο που ίχνη μερικών μετάλλων είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη φυτών και ζώων αυτά τα ίδια μέταλλα μπορεί να είναι τοξικά σε υψηλότερες συγκεντρώσεις. Άλλα μέταλλα δεν έχουν καμία βιολογική σημασία και μπορούν να είναι τοξικά ακόμα και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις [9].

Τα μέταλλα που εισέρχονται σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο σαν αδιάλυτα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται από τη στήλη νερού από τους ίδιους μηχανισμούς που απομακρύνονται τα TSS. Ανάλογα με το pH και το δυναμικό οξειδοαναγωγής, τα αδιάλυτα σωματίδια μπορεί να διαλυθούν ξανά και να επιστρέψουν στην υδατική φάση. Σημαντικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης μετάλλων είναι η ανταλλαγή κατιόντων με τα ιζήματα του υγροβιότοπου, η δέσμευση από οργανική ύλη, η χημική κατακρήμνιση σε αδιάλυτα άλατα, σουλφίδια, ανθρακικά και η πρόσληψη από φυτά, άλγη και βακτήρια. Τα δεσμευμένα μέταλλα παραμένουν στα ανοξικά ιζήματα όπου προκύπτουν. Αυτά τα δεσμευμένα μέταλλα δεν είναι συνήθως βιοδιαθέσιμα και παραμένουν απομακρυσμένα

από το σύστημα. Αν τα ιζήματα διαταραχθούν ή προκληθεί επαναιώρησή τους, τα απομονωμένα μέταλλα θα επιστρέψουν στην υδατική φάση.

Τα μέταλλα ενσωματώνονται στη βιομάζα των υγροβιότοπων. Απορροφώνται από τη φυτική βλάστηση μέσω του ριζικού συστήματος και έπειτα κατανέμονται σε όλο το φυτό. Ο βαθμός της απορρόφησης αυτής εξαρτάται από το είδος του μετάλλου και το είδος του φυτού. Ο Gesberg et. al. (1984) βρήκε ότι η πρόσληψη των μετάλλων από τα φυτά είναι μικρή σε συστήματα υποεπιφανειακής ροής, ενώ άλλοι ισχυρίζονται ότι μέταλλα μπορούν να βρεθούν στις ρίζες των φυτών εξαιτίας της χημικής κατακρήμνισης και της προσρόφησης. Σε ένα σύστημα επεξεργασίας στο New Jersey βρέθηκε ότι το κάδμιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος, το νικέλιο και ο ψευδάργυρος συσσωρεύτηκαν στα υπολείμματα των φυτών στο τέλος της περιόδου ανάπτυξης σε πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις από ότι στα φυτά. Άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι μέταλλα όπως το κάδμιο, το χρώμιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το νικέλιο και ο ψευδάργυρος μπορούν να απομονωθούν στο χώμα και στη χλωρίδα και πανίδα του συστήματος.

Ως τώρα δεν υπάρχουν επαρκή μακροχρόνια στοιχεία για τεχνητούς υγροβιότοπους μεγάλης κλίμακας, που να παρέχουν μια αξιόπιστη εκτίμηση για την απόδοση της απομάκρυνσης των μετάλλων από τα απόβλητα. Εν τούτοις, σε συστήματα υποεπιφανειακής ροής και σε συστήματα επιφανειακής ροής πλήρως καλυμμένα με βλάστηση, οι αναερόβιες συνθήκες συντελούν στην κατακράτηση των περισσότερων μετάλλων με την κατακάθιση των ολικών αιωρούμενων στερεών και την μείωση της επαναιώρησης.

1.6.7 Άλλα οργανικά συστατικά

Υπάρχει μια ανησυχία για την τύχη πολλών ιχνών οργανικών ενώσεων, που περιέχονται στα απόβλητα, στο περιβάλλον. Οι οργανικές αυτές ενώσεις είναι μικροβιοκτόνα, θρεπτικά και άλλες ουσίες που προκύπτουν από χημικές διεργασίες και ανήκουν στην κατηγορία των πιο σημαντικών ρυπαντών. Η τύχη των ρυπαντών αυτών σε έναν υγροβιότοπο εξαρτάται από τις ιδιότητες της κάθε ένωσης, τα χαρακτηριστικά του υγροβιότοπου, το είδος της φυτικής βλάστησης και από άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι πιο σημαντικοί μηχανισμοί διαχωρισμού και απομάκρυνσης είναι η εξάτμιση, η καθίζηση, η βιοαποικοδόμηση, η προσρόφηση και η απορρόφησή τους από τα φυτά. Αυτοί οι μηχανισμοί έχουν ήδη αναλυθεί. Οι συντηρητικές οργανικές ενώσεις που έχουν διαχωριστεί από τη στήλη νερού συσσωρεύονται στα ιζήματα του υγροβιότοπου. Ένα μέρος απορροφάτε από τα φυτά και επιστρέφει στο σύστημα με την αποσύνθεσή τους. Από τη βιοαποικοδόμηση ορισμένων οργανικών ενώσεων προκύπτει η

παραγωγή ανόργανων τελικών προϊόντων, ή η παραγωγή τελικών προϊόντων περισσότερο τοξικών από τις αρχικές ενώσεις. Προς το παρόν όμως δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για την αποτελεσματικότητα της μακροπρόθεσμης απομάκρυνσης και για την καταστροφή των κυριότερων ρυπαντών [9].

Κεφάλαιο 2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Κάθετης Ροής

2.1 Εισαγωγή

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι κάθετης ροής, όπως δηλώνει και το όνομα τους, είναι υγροβιότοποι, όπου η ροή του αποβλήτου γίνεται κάθετα κατά μήκος της επιφάνειάς τους. Ο λόγος που τα συστήματα αυτά είναι πιο ελκυστικά σε σχέση με άλλα συστήματα υγροβιοτόπων, είναι η μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης BOD και αμμωνίας. [10]. Η πρακτική που ακολουθείται είναι ότι όσες μέρες διαρκεί η τροφοδοσία, το ίδιο ή το διπλάσιο διάστημα διαρκεί η περίοδος ξεκούρασης του συστήματος. Επίσης, η τροφοδοσία γίνεται με ασυνεχή τρόπο με αποτέλεσμα ενώ, γίνεται η αποστράγγιση του αποβλήτου, οι κενοί πόροι να γεμίζουν με αέρα.

Το γεγονός ότι με αυτού του είδους υγροβιοτόπων μπορούμε να πετύχουμε υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης COD, TSS, NH_4 και P, ανάλογα με το υλικό του υποστρώματος, οδήγησε στο να χρησιμοποιούνται για επεξεργασία υγρών αποβλήτων χωρίς πρωτοβάθμια επεξεργασία.

Σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να επιτευχθούν με τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων είναι :

- Η επιφάνεια να είναι ικανή στο να κατεισδύσει το απόβλητο στο χρονικό διάστημα που χωρίζει τις δύο δόσεις στο σύστημα
- Ο χρόνος επαφής του λύματος με το υπόστρωμα να είναι ικανός, ώστε να έρθει σε επαφή με τη μικροβιακή μάζα που αναπτύσσεται σε αυτό
- Να παρέχει ικανοποιητική επιφάνεια για την ανάπτυξη της βιομάζας
- Να επιτρέπει ικανοποιητική μεταφορά οξυγόνου

Ένα μειονέκτημα που έχουν αυτού του είδους τα συστήματα είναι το φράξιμο των πόρων. Λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης στερεών στα ανεπεξέργαστα λύματα, είναι δυνατόν να φράξουν οι πόροι του συστήματος και μετά από αρκετό χρονικό διάστημα να μειωθεί η προσροφητική ικανότητα του υποστρώματος με αποτέλεσμα να μειωθεί και η απόδοση απομάκρυνσης του φωσφόρου. Επίσης απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά την τροφοδοσία, να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή του λύματος στην επιφάνεια εφαρμογής ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο να έχουμε έξοδο σε λιγότερο χρόνο με αποτέλεσμα μικρή επεξεργασία.

2.2 Παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας

Ο σχεδιασμός των τεχνητών υδροβιοτόπων κάθετης ροής περιλαμβάνει την επιλογή προεπεξεργασίας (ανεπεξέργαστα λύματα ή από πρωτοβάθμια επεξεργασία), τον τρόπο τροφοδοσίας (ασυνεχής ή όχι) και τους ρυθμούς φόρτισης για την έκταση της επιφάνειας. Οι τεχνητοί υδροβιοτόποι κάθετης ροής αποτελούνται κυρίως από δύο στάδια. Και τα δύο αποτελούνται από τρία στρώματα με διαφορετικό υλικό ως προς το μέγεθος [11] :

- >30 cm πάχος με λεπτόκοκκο χαλίκι (2 – 8 mm)
- μεταβατικό στρώμα πάχους 10 – 20 cm με χαλίκι 5 – 20 mm
- στρώμα αποστράγγισης πάχους 10 – 20 cm με χαλίκι 20 – 40 mm

Η διαστρωμάτωση για το δεύτερο στάδιο είναι :

- >30 cm πάχος με άμμο ($0.25 \text{ mm} < d_{10} < 0.40 \text{ mm}$)
- μεταβατικό στρώμα πάχους 10 – 20 cm με χαλίκι 3 – 10 mm
- στρώμα αποστράγγισης πάχους 10 – 20 cm με χαλίκι 20 – 40 mm

Παρατηρούμε ότι τα δυο στάδια δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Η κύρια διαφορά παρατηρείται στο επιφανειακό στρώμα και κυρίως στο πληρωτικό υλικό. Έτσι στο πρώτο στάδιο τοποθετείται λεπτόκοκκο χαλίκι για την αποφυγή φραξίματος των πόρων καθώς δέχεται ανεπεξέργαστο λύμα, ενώ στο δεύτερο επιφανειακό στρώμα τοποθετείται άμμος. Επίσης, αυτή η διαφοροποίηση του επιφανειακού στρώματος συμβαίνει για να υπάρχει έλεγχος της βιομάζας που αναπτύσσεται στο πρώτο στάδιο, καθώς και για να διασφαλιστεί η ύπαρξη αερόβιων συνθηκών. Το κλειδί για την επίτευξη αυτού του στόχου, είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η τροφοδοσία. Αυτή διαρκεί συνήθως 3 με 4 ημέρες [12] και ακολουθεί μια περίοδος διπλάσια σε χρονική διάρκεια που δεν γίνεται τροφοδοσία. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η ανάπτυξη της βιομάζας στο υπόστρωμα, ενισχύεται ο αερισμός και ενισχύεται η βιοδιάσπαση των οργανικών στερεών που παραμένουν στην επιφάνεια του πρώτου σταδίου. Επίσης κατά την περίοδο που γίνεται η τροφοδοσία αυτή, γίνεται ασυνεχώς έτσι ώστε εκτός από την ενίσχυση των αερόβιων συνθηκών, να διασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή του λύματος και των στερεών σε ολόκληρη την επιφάνεια.

2.3 Φαινόμενα φραξίματος των πόρων

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά φαινόμενα που συναντάμε στους τεχνητούς υγροβιότοπους κάθετης ροής είναι το φράξιμο των πόρων του υποστρώματος. Το φαινόμενο αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δε εμφανίζεται σε όλα τα συστήματα στο ίδιο χρονικό διάστημα. Αυτοί είναι ο ρυθμός φόρτισης του αποβλήτου, η συγκέντρωση στα στερεά, το είδος του υποστρώματος, η πυκνότητα της βλάστησης και η θερμοκρασία [13].

Το φράξιμο των πόρων στην επιφάνεια κυρίως τον προκαλούν τα ανόργανα σωματίδια ανάλογα με το υδραυλικό φορτίο φόρτισης του συστήματος και τη συγκέντρωσή τους σε αυτό. Αντίθετα το φράξιμο των πόρων προκαλείται από την ανάπτυξη της βιομάζας που εξαρτάται με τη σειρά της από την περιεκτικότητα του λύματος σε οργανικά στερεά, το χρόνο επαφής και τη θερμοκρασία αλλά και με τον χρόνο για τον οποίο το σύστημα παραμένει χωρίς τροφοδοσία.

Ένας δεύτερος παράγοντας είναι οι ρίζες που αναπτύσσονται σε βάθος άλλα αυτό είναι ένα φαινόμενο εποχικό και ουσιαστικά είναι ένας κύκλος ζωής και θανάτου των ριζών. Τέλος η χημική κατακρήμνιση ανθρακικών είναι παράγοντας που συνεισφέρει στο φαινόμενο του φραξίματος των πόρων. Το φράξιμο των πόρων κατηγοριοποιείται στις εξής τρεις καταστάσεις [14] :

- καθόλου φράξιμο : ≤ 30 % του λύματος παραμένει στην επιφάνεια μεταξύ του χρονικού διαστήματος δυο δόσεων
- μερικό φράξιμο : $30 - 80$ % του λύματος παραμένει στην επιφάνεια μεταξύ του χρονικού διαστήματος δύο δόσεων
- πλήρες φράξιμο : ≥ 80 % του λύματος παραμένει στην επιφάνεια μεταξύ του χρονικού διαστήματος δύο δόσεων

Κεφάλαιο 3 Σχεδιασμός , Εγκατάσταση και Λειτουργία του Τεχνητού Υγροβιότοπου.

3.1 Εισαγωγή.

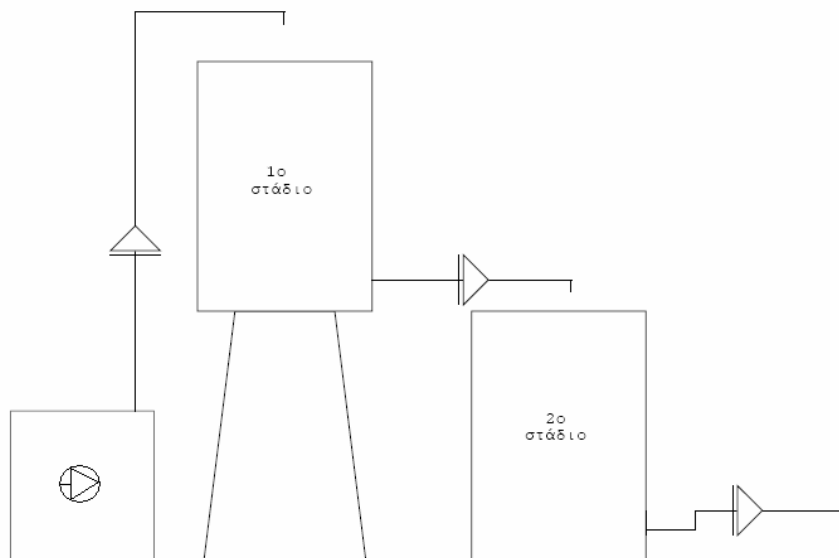
Σκοπός της εργασίας αυτής, είναι η μελέτη της απόδοσης ενός τεχνητού υγροβιότοπου για την επεξεργασία πυκνών λυμάτων σε ξηρά κλίματα. Ο τεχνητός υγροβιότοπος είναι ένας υγροβιότοπος κάθετης ροής, αποτελείται από δυο γραμμές και στήθηκε στο χώρο του εργαστηρίου «Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος» του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η μία γραμμή περιείχε τα φυτά *Phragmites australis* ενώ η άλλη όχι, και η τροφοδοσία του συστήματος γινόταν ανά τρεις μέρες με μέσο όγκο λυμάτων τα 60 λίτρα ανά γραμμή.

Στόχος της εργασίας, είναι η ανάδειξη των τεχνητών υγροβιοτόπων ως ένα αποτελεσματικό και ταυτόχρονα χαμηλού κόστους σύστημα, για την επεξεργασία λυμάτων σε μη αστικές περιοχές.

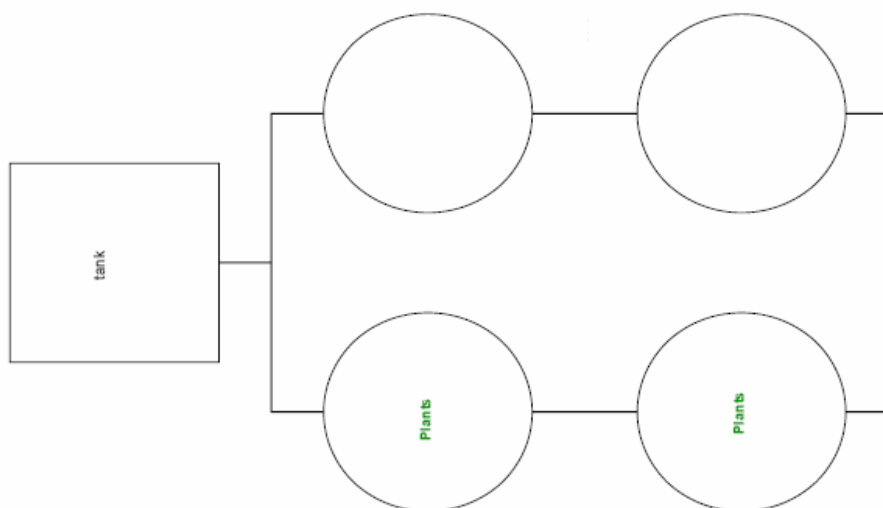
3.2 Πειραματική Διάταξη του τεχνητού Υγροβιότοπου.

Ο τεχνητός υγροβιότοπος είναι ένας υγροβιότοπος κάθετης ροής και αποτελείται από δύο γραμμές. Η μια γραμμή περιέχει φυτά (*Phragmites australis*) ενώ η άλλη όχι, με σκοπό να μελετηθεί ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής των φυτών. Κάθε γραμμή αποτελείται από δύο στάδια . Τα δύο στάδια μεταξύ τους έχουν υψομετρική διαφορά 80 εκατοστών έτσι ώστε να επιτυγχάνεται φυσική ροή. Τα τέσσερα πλαστικά βαρέλια επιλέχθηκαν με κριτήριο το ύψος που αρχικά ήταν 1 μέτρο καθώς από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι τα καλάμια του είδους *Phragmites australis* μπορούν να αναπτύξουν τις ρίζες τους σε βάθος μεγαλύτερο των 60εκατοστών [15].

Στα σχήματα 3.1 και 3.2 απεικονίζεται ο τεχνητός υγροβιότοπος σε πλάγια τομή και κάτοψη.



Σχήμα 3.1 – Πλάγια τομή του Τεχνητού Υγροβιότοπου.



Σχήμα 3.2 – Κάτοψη του Τεχνητού Υγροβιότοπου.

Το αποστραγγιστικό σύστημα είναι το ίδιο για όλα τα στάδια. Αποτελείται από τέσσερις παράλληλους σωλήνες από πλαστικό HDPE \varnothing 32 mm. Στο άνω ημικύκλιο ανοίχτηκαν τρύπες σε τρεις σειρές στο κάθε ένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 – Σύστημα αποστράγγισης.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3 το σύστημα αποστράγγισης δεν εφάπτεται με τον πυθμένα και επίσης δεν καλύπτει όλη την επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό στον πυθμένα κάτω από το αποστραγγιστικό σύστημα τοποθετήθηκε ένα στρώμα χαλαζιακής άμμου. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της μονάδας είναι η υπερυψωμένη έξοδος και στις δυο γραμμές σε σχέση με το επίπεδο που βρίσκεται το σύστημα αποστράγγισης. Αυτό έγινε ώστε να γίνει επεξεργασία του λύματος και κάτω από ανοξικές συνθήκες που ευνοούν την απονιτροποίηση. Το ανώτερο σημείο απέχει από τον πυθμένα του βαρελιού 15 εκατοστά αλλά αν συνυπολογίσουμε ότι η αποστράγγιση γίνεται από απόσταση 5 εκατοστών από τον πυθμένα τότε πρακτικά το ύψος λύματος που παραμένει στο τελευταίο στάδιο είναι 10 εκατοστά (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 – Έξοδος του επεξεργασμένου λύματος από τον Τεχνητό Υγροβιότοπο.

3.3 Πληρωτικά υλικά

Ως πληρωτικό υλικό επιλέχτηκαν δύο διαφορετικά υλικά. Χαλίκι και χαλαζιακή άμμος. Ο λόγος για την επιλογή του συγκεκριμένου υλικού ήταν η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο προσδίδει μεγάλη προσροφητική ικανότητα σε φωσφορικά. Η διαστρωμάτωση του πληρωτικού υλικού στις δεξαμενές είναι ίδια για τις δύο γραμμές. Η διαστρωμάτωση μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου σταδίου κάθε γραμμής διαφέρει.

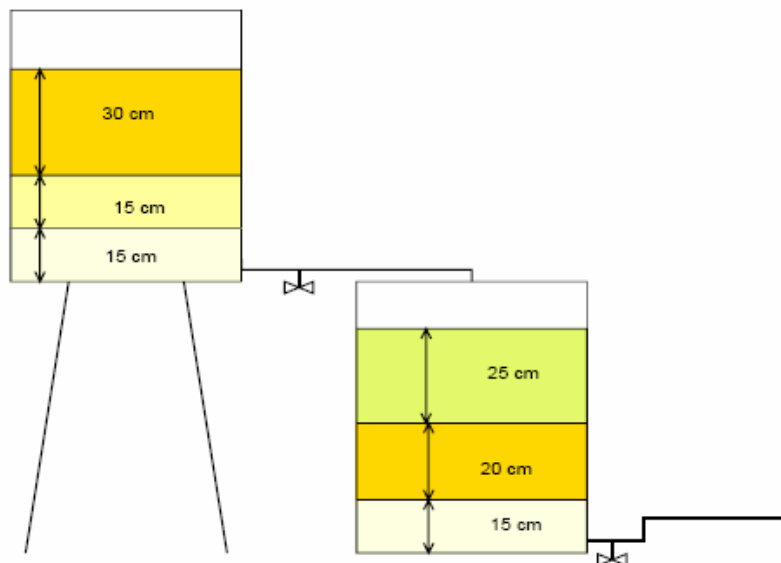
Στο πρώτο στάδιο τα βαρέλια έχουν μόνο χαλίκι, σε αντίθεση με το δεύτερο στάδιο όπου το πρώτο στρώμα αποτελείται από χαλαζιακή άμμο. Αυτό συμβαίνει γιατί τα πρώτα στάδια και των δύο γραμμών δέχονται ακατέργαστο λύμα. Το πάχος κάθε στρώματος και το υλικό είναι το ίδιο για το αντίστοιχο στάδιο κάθε γραμμής. Από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, και στα δύο στάδια, μεγαλώνει η διάμετρος των υλικών, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλή φίλτρανση από τα στερεά και να διευκολύνεται η διέλευσή του προς το αποστραγγιστικό σύστημα. Για το πρώτο στάδιο κάθε γραμμής, από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, η διάταξη του υποστρώματος είναι :

- 30 cm χαλίκι διάμετρος < 1 cm
- 15 cm χαλίκι διάμετρος 1 – 1.5 cm
- 15 cm χαλίκι διάμετρος 1.5 – 3 cm

Στο δεύτερο στάδιο η διάταξη του υποστρώματος έχει διαμορφωθεί ως εξής :

- 25 cm χαλαζιακή άμμος 3 – 5 mm
- 20 cm χαλίκι διάμετρος < 1 cm
- 15 cm χαλίκι διάμετρος 1.5 – 3 cm

Η διαστρωμάτωση του πληρωτικού υλικού στις δεξαμενές σε πλάγια τομή παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5



Σχήμα 3.5 – Διαστρωμάτωση πληρωτικού υλικού στις δεξαμενές

3.4 Βλάστηση

Η φυτική βλάστηση ασκεί ένα πολύ σημαντικό και ολοκληρωμένο ρόλο στη λειτουργία των συστημάτων τεχνητών υδροβιοτόπων με τη μεταφορά οξυγόνου δια μέσου του ριζικού συστήματος [20]. Έτσι με αυτόν τον τρόπο, εφοδιάζεται το μέσο κάτω από την επιφάνεια του νερού, για ανάπτυξη και συγκράτηση των μικροοργανισμών που διενεργούν τη βασική επεξεργασία του εφαρμοζόμενου αποβλήτου. Διάφορα είδη φυτών, που ριζοβολούν σε χονδρόκοκκα υποστρώματα και αναφύονται ή και βλαστάνουν πάνω από την επιφάνεια του νερού, χρησιμοποιούνται στα συστήματα των υδροβιοτόπων. Τα πιο συνήθη είδη φυτών, είναι διάφορα είδη της οικογένειας *Cyperaceae* κυρίως του γένους *Carex Spp.* (είδος κύπερης) και των γενών *Scirpus*, *Typha* και *Phragmites* δηλαδή βούρλων, ψαθιού και νεροκάλαμων, αντίστοιχα.

Το είδος της βλάστησης που επιλέχθηκε στον τεχνητό υδροβιότοπο για την πραγματοποίηση εργαστηριακών πειραμάτων, ήταν τα καλάμια *Phragmites australis*. Το χαρακτηριστικό αυτού του είδους, είναι η ανάπτυξη των ριζών σε μεγάλο βάθος > 60 cm, η μεγάλη αντοχή σε αναερόβιες συνθήκες και η μέτρια αντοχή σε ανθρακικό ασβέστιο.[15] Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των ριζών στο εργαστήριο, η ανάπτυξη των νέων καλάμιών και η μονάδα μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής.



Σχήμα 3.6 – Κατασκευή της πιλοτικής μονάδας.

3.5 Λειτουργία της μονάδας

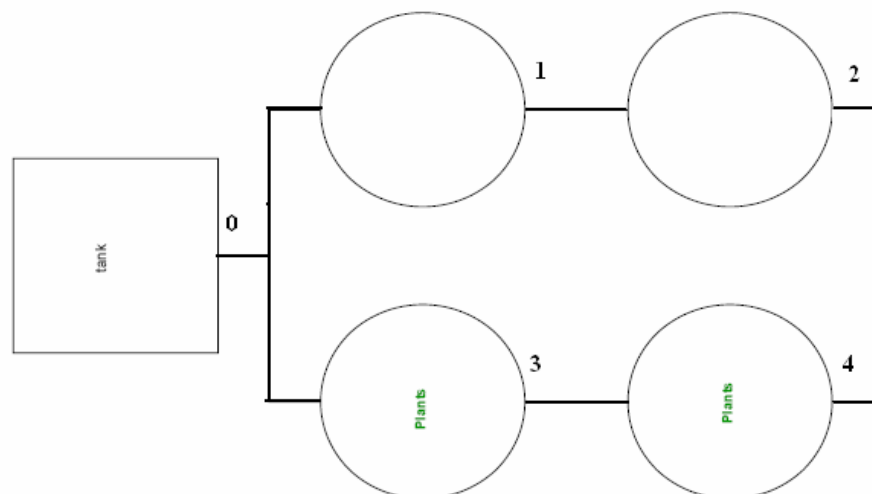
Η τροφοδοσία της μονάδας γινόταν με λύμα από την είσοδο της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. (Σχήμα 3.7)



Σχήμα 3.7 – Φρεάτιο δειγματοληψίας

Ο όγκος του λύματος κάθε φορά ήταν 120 λίτρα. Η περίοδος τροφοδοσίας ήταν μία μέρα και η περίοδος ξεκούρασης του συστήματος ήταν 2 μέρες. Την ημέρα της τροφοδοσίας, αυτή γινόταν ασυνεχώς σε 5 δόσεις με μέση παροχή τα 12 λίτρα σε κάθε γραμμή. Το διάστημα μεταξύ της κάθε δόσης ήταν 2,5 ώρες και η δειγματοληψία γινόταν σε 5 σημεία :

- 1 στην είσοδο (σημείο 0)
- 2 ενδιάμεσα, ένα σε κάθε γραμμή (σημεία 1 και 3)
- 2 στην έξοδο, ένα σε κάθε γραμμή (σημεία 2 και 4)



Σχήμα 3.8 – Σημεία δειγματοληψίας

Η έναρξη της λειτουργίας της μονάδας ήταν στις 1 Ιουλίου 2005 και η τελευταία τροφοδοσία έγινε στις 2 Νοεμβρίου 2005.

3.6 Αναλυτικές Μέθοδοι

Οι παράμετροι που προσδιορίζονταν σε κάθε δείγμα ήταν :

- BOD₅
- COD
- TOC
- TN
- NH₄-N
- SS
- Ανιόντα (PO₄⁻³, SO₄⁻², Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, F⁻)

BOD₅

Ο προσδιορισμός έγινε μανομετρικά με μετρήσεις πτώσης πίεσης των εταιρειών OXITOP και AQUALYTIC. Σε ειδικά μπουκάλια τοποθετείται η κατάλληλη ποσότητα δείγματος, ένας μαγνήτης ανάδευσης, αναστολέας νιτροποίησης και NaOH. Τα μπουκάλια τοποθετούνται σε ειδικό χώρο με σταθερή θερμοκρασία στους 20 °C όπου γίνεται ανάδευση για 5 μέρες. Τα πώματα των μπουκαλιών είναι και οι μετρητές της πτώσης πίεσης. Το αριθμητικό αποτέλεσμα που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με έναν

ειδικό συντελεστή. Ο συντελεστής δίνεται από την εταιρεία ανάλογα με τον όγκο του δείγματος. Το γινόμενο αυτό δίνει και τη συγκέντρωση του BOD₅.

OXITOP			AQUALYTIC		
Εύρος ppm	Όγκος ml	Συντελεστής	Εύρος ppm	Όγκος ml	Συντελεστής
0 – 200	250	5	0 – 200	244	5
0 – 400	164	10	0 – 400	157	10
0 – 800	97	20	0 – 800	94	20
0 - 2000	43.5	50	0 - 2000	56	40

COD

Χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρείας Merck

- 1.14540.0001 για COD 10 – 150 ppm
- 1.14541.0001 για COD 25-1500 ppm

Χώνευση του αντιδραστηρίου με 3 ml αδιήθητου δείγματος για 2 ώρες στους 148 °C και μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο στα 593 nm για τα αντιδραστήρια με εύρος 25 – 1500 ppm και στα 445 nm για τα αντιδραστήρια με εύρος 10 – 150 ppm.

TOC

Προσθήκη 1% κ.ο. HCl 2N σε κάθε δείγμα και μέτρηση με το όργανο προσδιορισμού TOC, SHIMADZU TOC ANALYZER.

TN

Χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρείας Merck

- 1.14763.0001 για εύρος τιμών από 10 – 150 ppm

Για κάθε μέτρηση απαιτούνται 1 ml δείγματος και 9 ml απιονισμένου νερού. Στη συνέχεια ακολουθεί χώνευση για 1 ώρα στους 120 °C και ο προσδιορισμός γίνεται με φασματοφωτόμετρο στα 338 nm.

NH₄-N

Χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρείας Merck

- 1.00683.0001 για εύρος τιμών από 2 - 75 ppm
- 1.14742.0001 για εύρος τιμών από 0.05 - 3 ppm

Για δείγματα με εύρος από 2 – 75 ppm απαιτούνται 0.2 ml δείγματος και για εύρος από 0.05 – 3 ppm 5ml δείγματος. Επίσης ετοιμάζονται και τα αντίστοιχα τυφλά δείγματα και η μέτρηση γίνεται στα φασματοφωτόμετρο στα 712 nm και στα 692 nm αντίστοιχα.

SS

Ο προσδιορισμός γίνεται με διήθηση υπό κενό συγκεκριμένου όγκου σε φίλτρα που έχουν ζυγιστεί πριν τη διαδικασία. Στη συνέχεια τα φίλτρα τοποθετούνται σε φούρνο ξήρανσης στους 105 °C , ακολουθεί νέα ζύγιση του φίλτρου και από τη διαφορά του βάρους και με τη διαίρεσή της με τον όγκο του δείγματος υπολογίζεται η συγκέντρωση. Στο δείγμα της εισόδου ο όγκος δείγματος ήταν 5 – 15 ml, στα δείγματα από ενδιάμεσα σημεία 50 – 150 ml και στα δείγματα από τις εξόδους 200 – 250 ml.

Ανιόντα

Ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων των ιόντων έγινε με τη χρήση ιοντικής χρωματογραφίας (DIONEX CHROMATOGRAPHY). Η μέθοδος ανήκει στην υγρή χρωματογραφία και το φέρον μέσο είναι διάλυμα ανθρακικού νατρίου 0.5M. Ο προσδιορισμός βασίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μετατροπής της σε συγκέντρωση. Ο όγκος δείγματος είναι 25 ml και το δείγμα πρώτα έχει διηθηθεί από φίλτρα με πόρους 0.45 και 0.2 μm για την απομάκρυνση των στερεών.

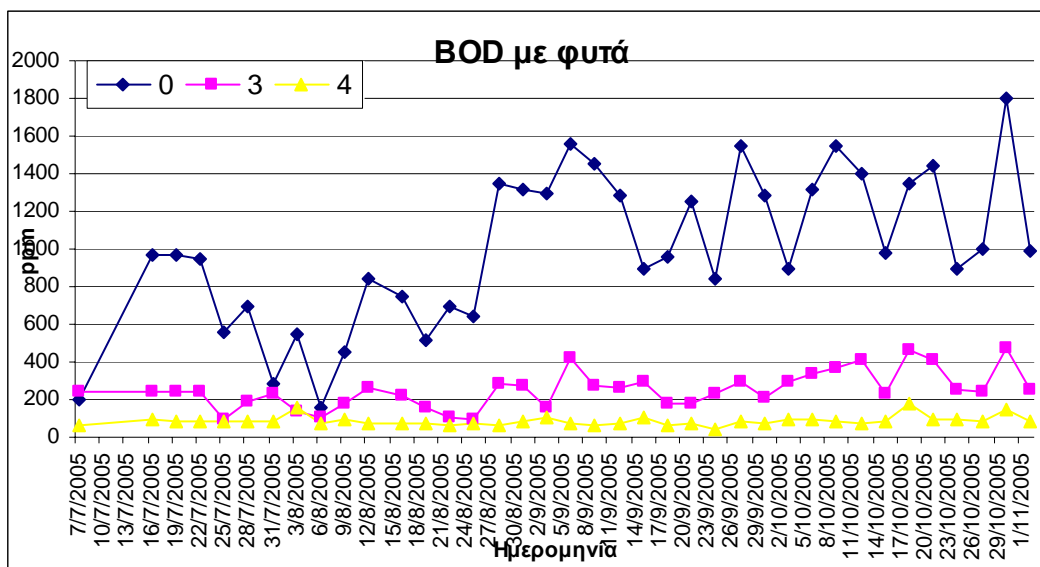
Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα

4.1 Οργανικός Άνθρακας

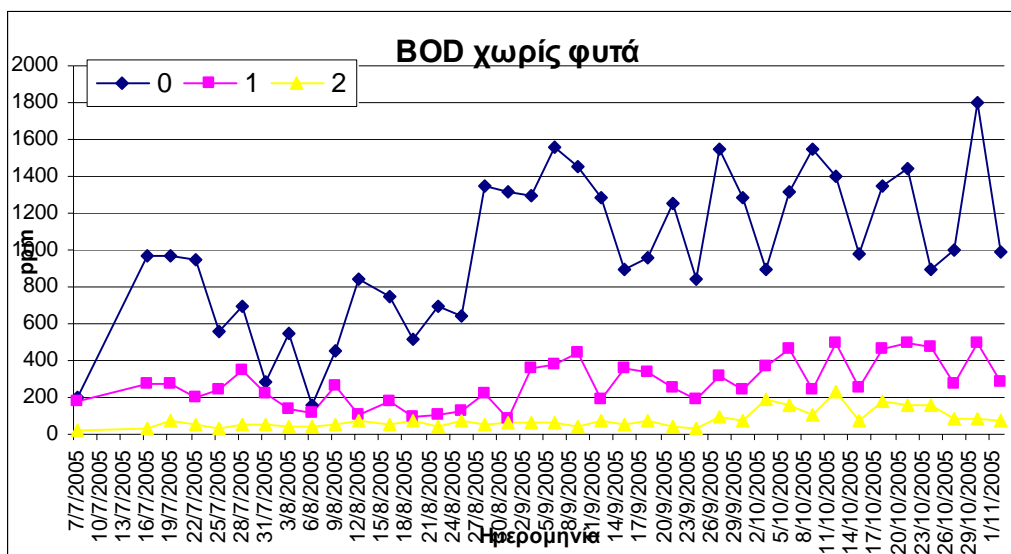
Οι μετρήσεις που αφορούν τον οργανικό άνθρακα είναι : BOD₅, COD και TOC.

BOD₅

Στα διαγράμματα 4.1.1 και 4.1.2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του BOD₅ στη γραμμή με βλάστηση και σε αυτή χωρίς, στην είσοδο, στα ενδιάμεσα σημεία και στην έξοδο αντίστοιχα.

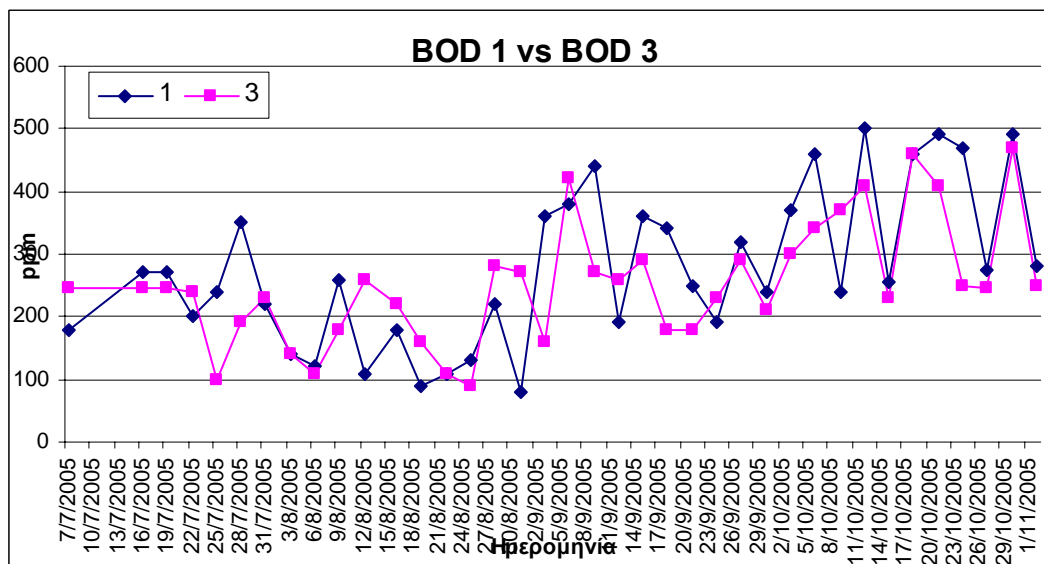


Διάγραμμα 4.1.1 – Συγκεντρώσεις του BOD₅ στην είσοδο (0), ενδιάμεσα (3) και στην έξοδο (4) της γραμμής με βλάστηση.

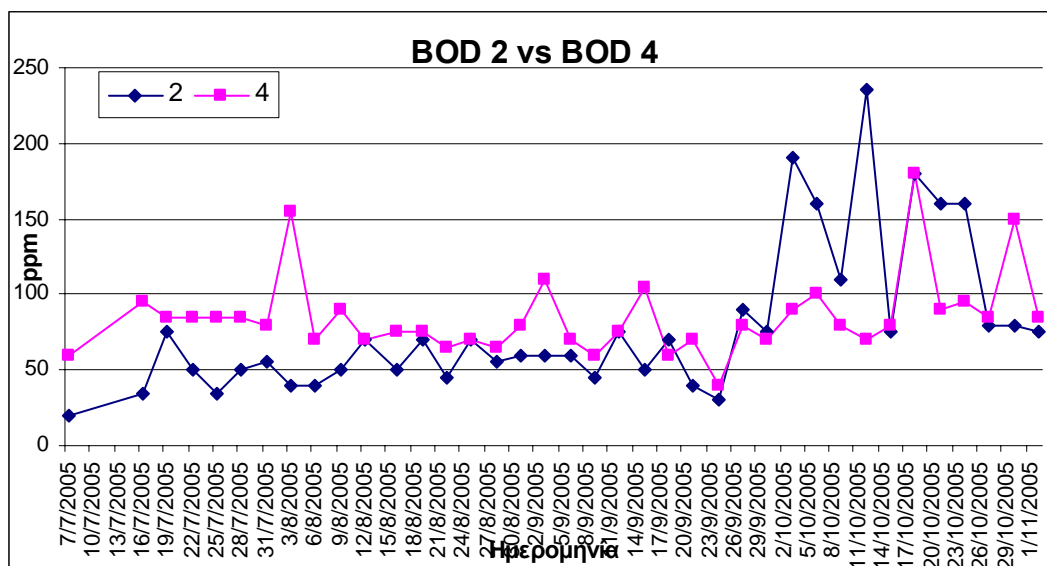


Διάγραμμα 4.1.2 – Συγκεντρώσεις του BOD₅ στην είσοδο (0), ενδιάμεσα (1) και στην έξοδο (2) της γραμμής χωρίς βλάστηση.

Στα διαγράμματα 4.1.3 και 4.1.4 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία των δύο γραμμών και στις εξόδους αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.1.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του BOD₅ στα ενδιάμεσα σημεία της γραμμής με βλάστηση (3) και αυτής χωρίς (1).



Διάγραμμα 4.1.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του BOD₅ στην έξοδο της γραμμής με βλάστηση (4) και αυτής χωρίς (2).

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις του BOD₅ των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο μεταξύ εισόδου – ενδιάμεσων σημείων, ενδιάμεσων σημείων - εξόδων και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

0 vs 1	0 vs 2	1 vs 2	0 vs 3	0 vs 4	3 vs 4
72%	92%	72%	75%	91%	66%

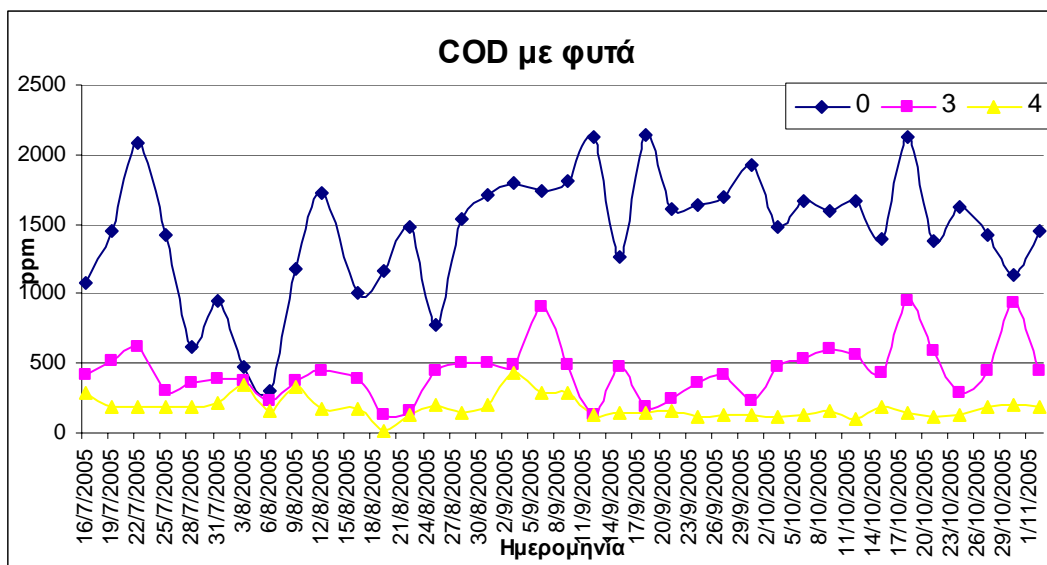
Πίνακας 4.1.1 – Οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις του BOD₅ των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο

Η συγκέντρωση του BOD₅ παρουσιάζει διακυμάνσεις στην είσοδο και στα ενδιάμεσα σημεία και τείνει να σταθεροποιηθεί στην έξοδο. Η μεγαλύτερη απομάκρυνση επιτυγχάνεται μεταξύ του ενδιάμεσου σημείου και της εξόδου και στις δύο γραμμές. Η γραμμή με βλάστηση έχει επιφέρει μεγαλύτερη μείωση στο πρώτο στάδιο και η γραμμή χωρίς βλάστηση στο δεύτερο.

Από τη σύγκριση των συγκεντρώσεων του BOD₅ στα δύο ενδιάμεσα σημεία προέκυψε ότι παρουσιάζουν μια ομοιόμορφη συμπεριφορά και στις δύο γραμμές. Οι τιμές στις εξόδους παρουσιάζουν μικρές διαφορές, και από τον Οκτώβριο και μετά, οι τιμές των συγκεντρώσεων στην γραμμή με τα φυτά τείνουν να μειώνονται περισσότερο από ότι στη γραμμή χωρίς φυτά.

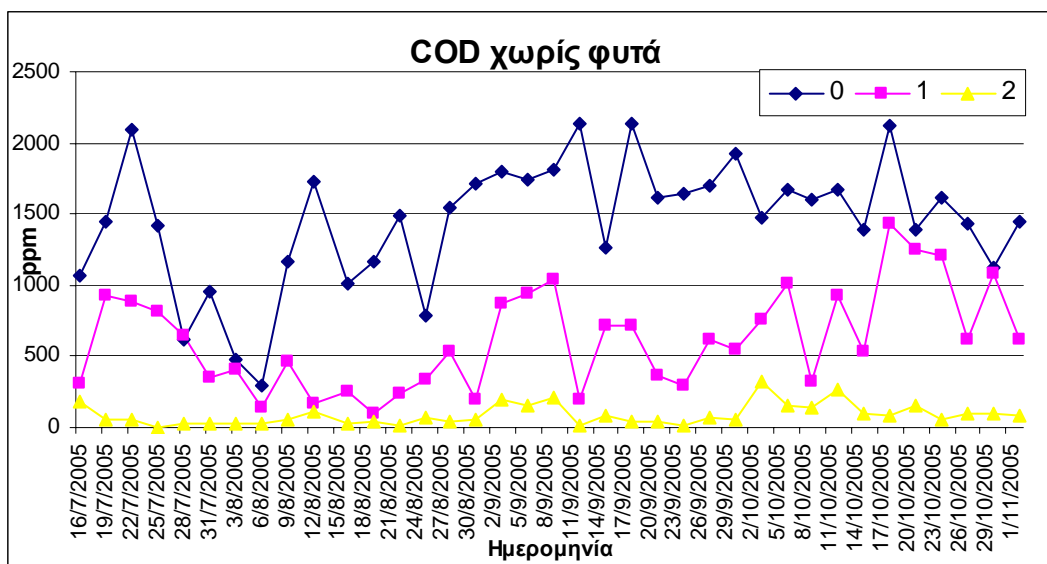
COD

Στο διάγραμμα 4.1.5 παρουσιάζεται η διακύμανση της συγκέντρωσης του COD στη γραμμή με τη βλάστηση, στην είσοδο, στα ενδιάμεσα σημεία και στην έξοδο. Η συγκέντρωση στην είσοδο δεν είναι σταθερή αλλά παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Η καμπύλη της συγκέντρωσης στο ενδιάμεσο σημείο έχει την τάση να ακολουθεί τη διακύμανση της καμπύλης εισόδου. Αντίθετα, η καμπύλη της συγκέντρωσης στη έξοδο παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση.



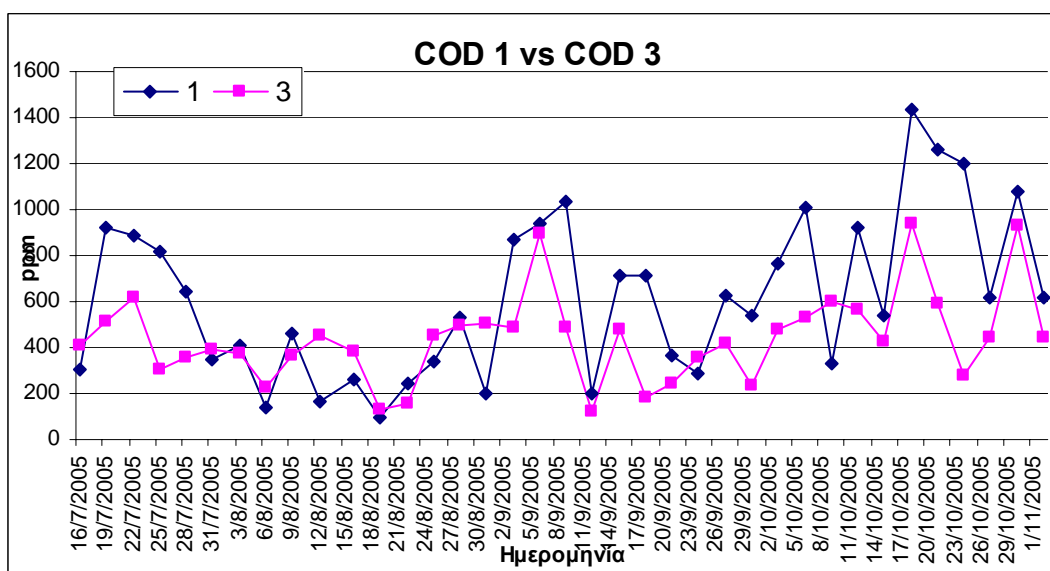
Διάγραμμα 4.1.5 – Συγκέντρωση του COD στην είσοδο (0), στο ενδιάμεσο σημείο (3) και στην έξοδο (4) της γραμμής με βλάστηση.

Στο διάγραμμα 4.1.6 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι συγκεντρώσεις του COD στη γραμμή χωρίς βλάστηση. Στη γραμμή χωρίς βλάστηση, η καμπύλη της συγκέντρωσης στο ενδιάμεσο σημείο δεν είναι σταθερή αλλά ακολουθεί σχεδόν τη διακύμανση της καμπύλης για τη συγκέντρωση στην είσοδο. Η καμπύλη για την συγκέντρωση στην έξοδο παραμένει σταθερή.

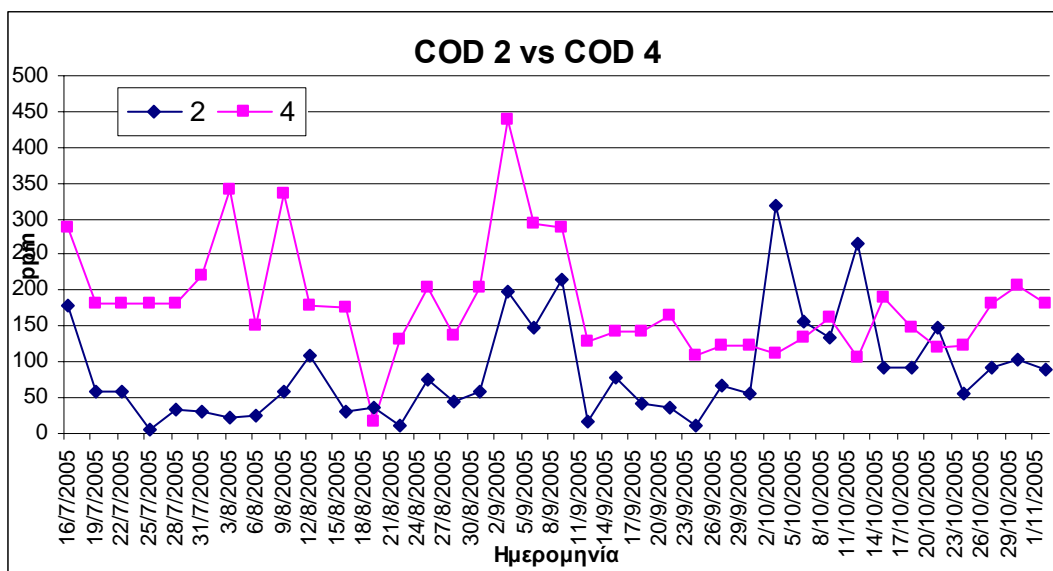


Διάγραμμα 4.1.6 – Συγκέντρωση του COD στην είσοδο (0), στο ενδιάμεσο σημείο (1) και στην έξοδο (2) της γραμμής χωρίς βλάστηση.

Στα διαγράμματα 4.1.7 και 4.1.8 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία των δύο γραμμών και στις εξόδους τους αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.1.7 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του COD στα ενδιάμεσα σημεία της γραμμής με βλάστηση (3) και αυτής χωρίς (1).



Διάγραμμα 4.1.8 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του COD στις εξόδους της γραμμής με βλάστηση (4) και αυτής χωρίς (2).

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις του COD των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο μεταξύ εισόδου – ενδιάμεσων σημείων, ενδιάμεσων σημείων - εξόδων και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

0 vs 1	0 vs 2	1 vs 2	0 vs 3	0 vs 4	3 vs 4
58%	94%	86%	70%	87%	59%

Πίνακας 4.1.2 – Οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις του COD των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο

Το ποσοστό απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου είναι υψηλό και στις δύο γραμμές. Μετά το δεύτερο στάδιο κάθε γραμμής (έξοδος) είχαμε μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης σε σύγκριση με τη μείωση που γινόταν στο πρώτο στάδιο κάθε γραμμής. Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι, στη δεύτερη δεξαμενή ο αγωγός εξόδου ανάγκαζε το λύμα να παραμένει στο σύστημα. Έτσι αυξανόταν ο χρόνος παραμονής και δινόταν η ευκαιρία στους χημειοτεροτρόφους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται σε ανοξικές συνθήκες (απονιτροποιητές) να καταναλώνουν όσον το δυνατόν περισσότερο οργανικό φορτίο. Συγκρίνοντας τις δύο γραμμές παρατηρούμε ότι στη γραμμή με βλάστηση έχουμε μείωση στο πρώτο στάδιο, στη γραμμή χωρίς βλάστηση έχουμε μεγαλύτερη

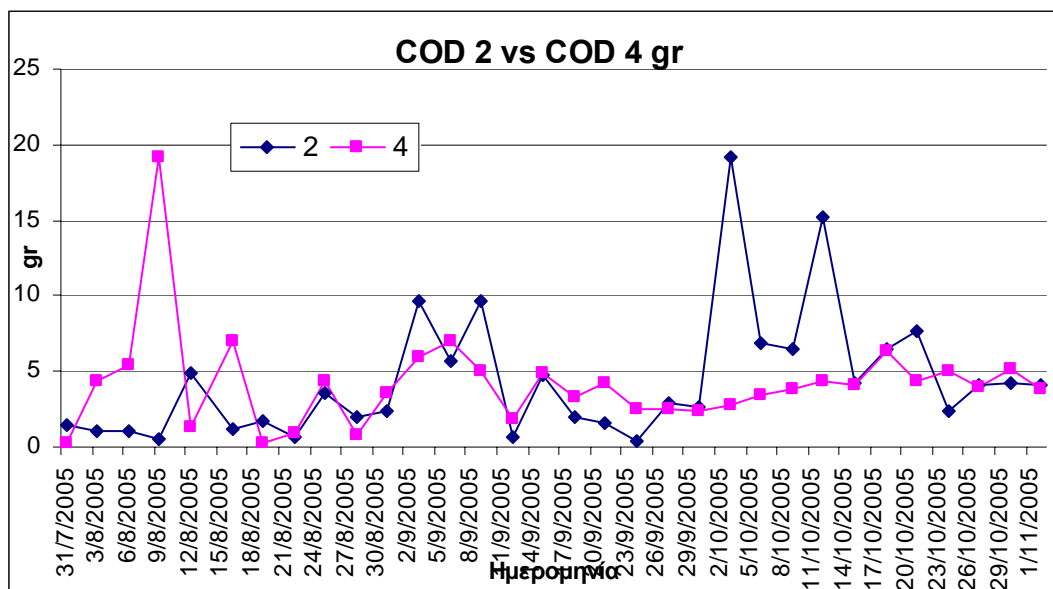
απόδοση στο δεύτερο και η μεγαλύτερη συνολική μείωση επιτυγχάνεται στη γραμμή χωρίς βλάστηση.

Εντούτοις, αν εκφράσουμε τις τιμές των συγκεντρώσεων σε μάζα , τότε τα ποσοστά απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου, διαφοροποιούνται και η γραμμή με βλάστηση τείνει να έχει καλύτερα αποτελέσματα και μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών του καλοκαιριού, της εξατμισοδιαπνοής και των αναγκών των φυτών σε λύμα, η έξοδος της γραμμής με βλάστηση ήταν ουσιαστικά η μισή σε όγκο (ο όγκος του λύματος που εισαγόταν σε κάθε γραμμή ήταν 60 λίτρα.), από ότι αυτή της γραμμής χωρίς βλάστηση. Όποτε, εάν πολλαπλασιάσουμε τις συγκεντρώσεις με τους όγκους της κάθε γραμμής τα ποσοστά απομάκρυνσης θα είναι :

Συγκεντρώσεις		Μάζα	
0 vs 2	0 vs 4	0 vs 2	0 vs 4
94%	87%	95%	96%

Πίνακας 4.1.3 – Σύγκριση των επί τοις εκατό απομακρύνσεων των μέσων τιμών του COD εκφρασμένη σε ppm και σε gr.

Στο διάγραμμα 4.1.9 γίνεται σύγκριση των δύο γραμμών στις εξόδους , εκφρασμένη σε μονάδες μάζας. Από αυτό προκύπτει ότι η γραμμή με βλάστηση (4) δίνει μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης.

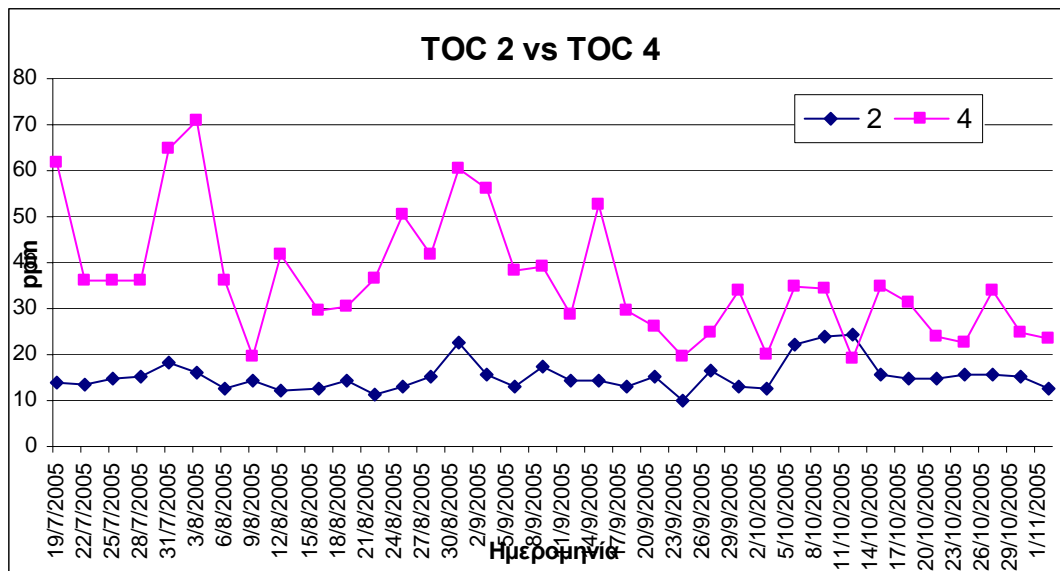


Διάγραμμα 4.1.9 – Σύγκριση των δύο γραμμών στις εξόδους, εκφρασμένη σε μονάδες μάζας.

TOC

Στο διάγραμμα 4.1.10 παρουσιάζεται η συγκέντρωση του διαλυμένου οργανικού άνθρακα στην έξοδο της γραμμής με βλάστηση, και η συγκέντρωση του ολικού οργανικού άνθρακα στη γραμμή χωρίς βλάστηση.

Για λόγους καλής λειτουργίας του αναλυτή TOC, τα δείγματα από τη γραμμή με βλάστηση διηθήθηκαν λόγω αυξημένων συγκεντρώσεων στερεών. Έτσι, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι δύο καμπύλες να μην είναι αριθμητικά συγκρίσιμες. Αυτό που δείχνει το διάγραμμα αποτελεί ακόμη μία ένδειξη, ότι η γραμμή χωρίς βλάστηση απομακρύνει περισσότερο οργανικό φορτίο.



Διάγραμμα 4.1.10 – Σύγκριση της συγκέντρωσης του TOC στη γραμμή με βλάστηση (4) και σε αυτή χωρίς (2).

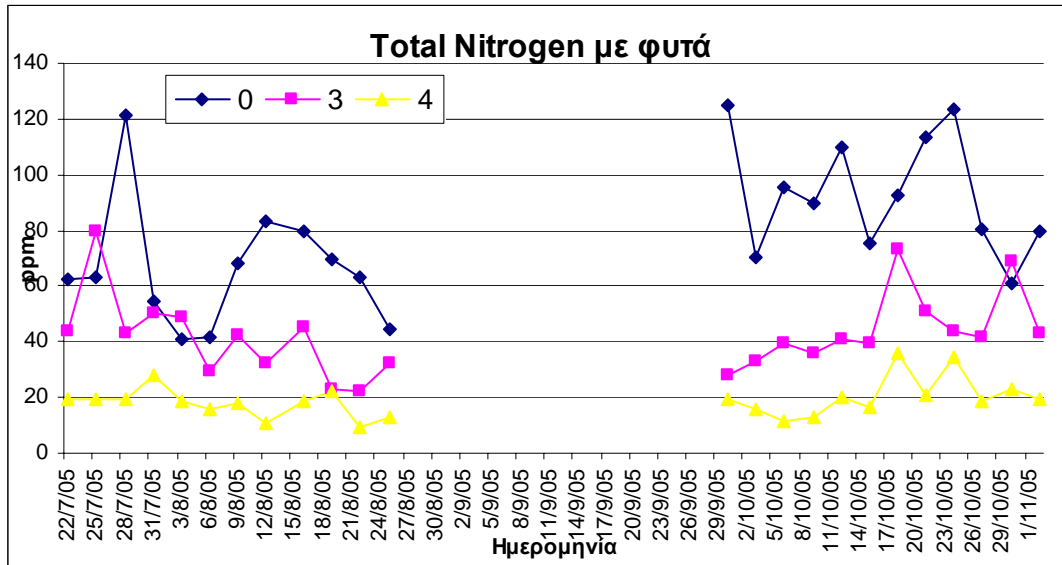
4.2 Άζωτο

Οι μετρήσεις που έγιναν και σχετίζονται με το άζωτο είναι :

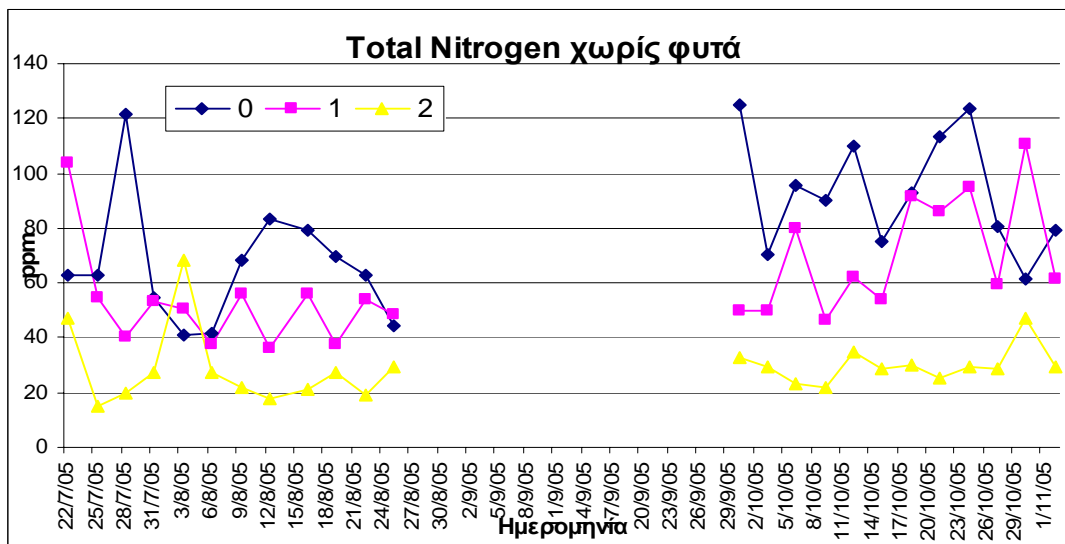
- Ολικό άζωτο
- Αμμωνία εκφρασμένη ως άζωτο
- Νιτρικά
- Νιτρώδη

Ολικό Αζώτο

Τα διαγράμματα 4.2.1 και 4.2.2 παρουσιάζουν τις συγκεντρώσεις του ολικού αζώτου σε είσοδο, ενδιάμεσα σημεία και έξοδο, για τη γραμμή με βλάστηση και για τη χωρίς βλάστηση αντίστοιχα. Λόγω έλλειψης αντιδραστηρίων τον μήνα Σεπτέμβριο, δεν πραγματοποιήθηκαν οι εργαστηριακές μετρήσεις, γι αυτό και παρατηρείται ένα κενό στα διαγράμματα.

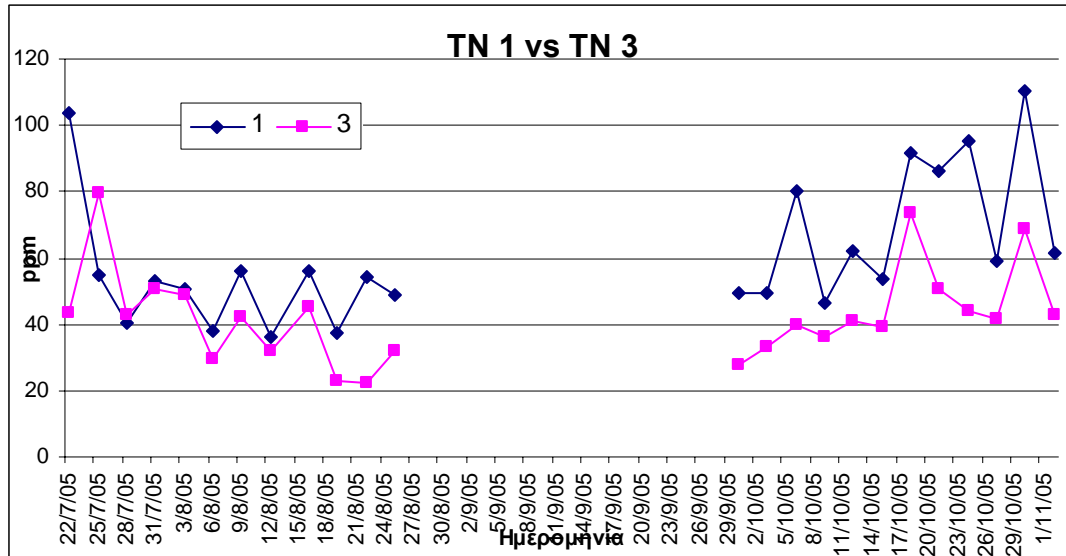


Διάγραμμα 4.2.1 – Συγκέντρωση ολικού αζώτου στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (3) και έξοδο (4).

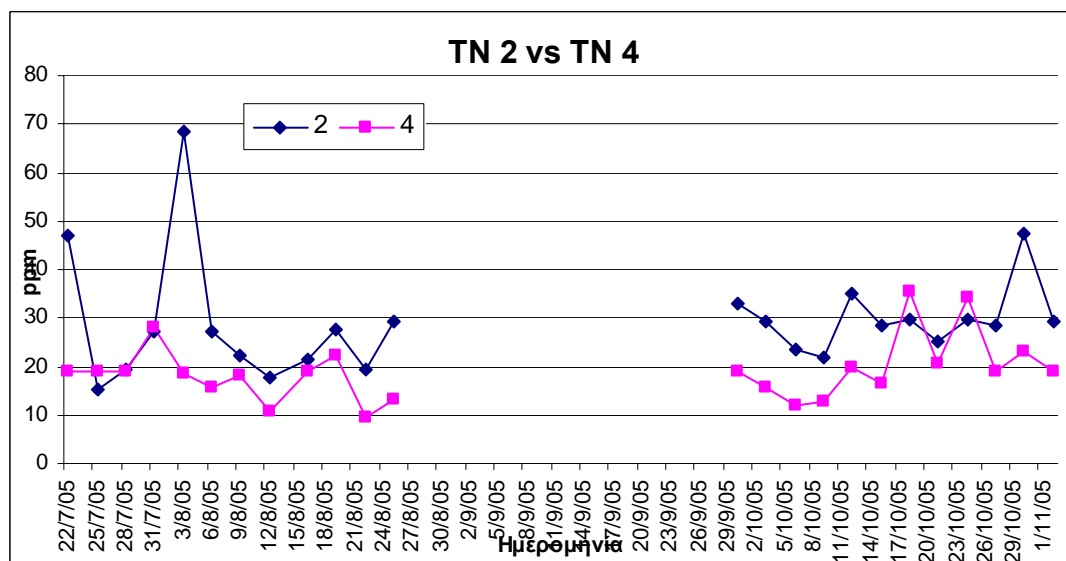


Διάγραμμα 4.2.2 – Συγκέντρωση ολικού αζώτου στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (1) και έξοδο (2).

Στα διαγράμματα 4.2.3. και 4.2.4 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.2.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων ολικού αζώτου στα ενδιάμεσα σημεία της γραμμής με βλάστηση (3) και της γραμμής χωρίς (1).



Διάγραμμα 4.2.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων ολικού αζώτου στις εξόδους της γραμμής με βλάστηση (4) και της γραμμής χωρίς (2).

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις του ολικού αζώτου των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο και Οκτώβριο μεταξύ εισόδου – ενδιάμεσων σημείων, ενδιάμεσων σημείων - εξόδων και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

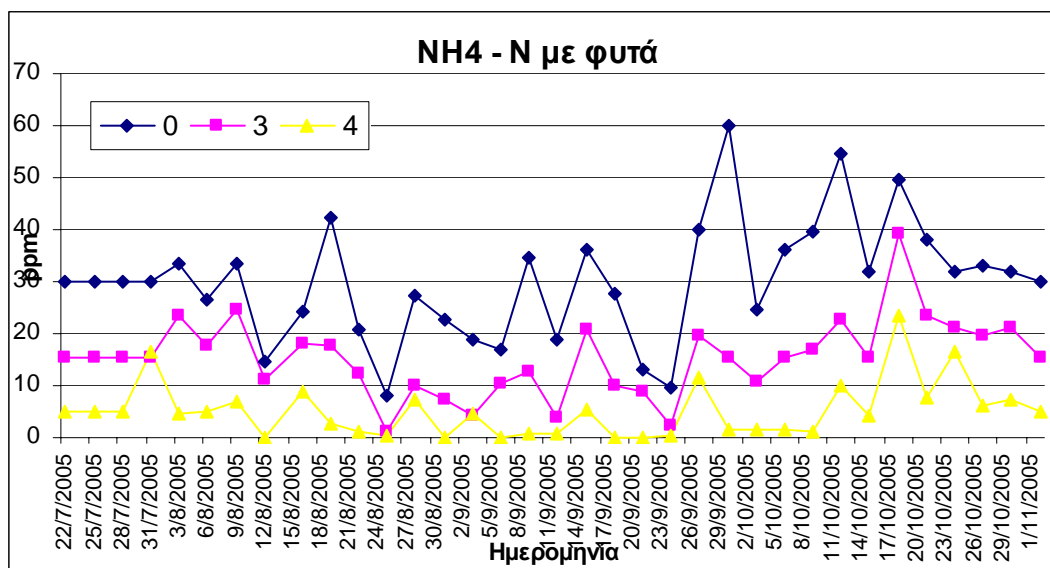
0 vs 1	0 vs 2	1 vs 2	0 vs 3	0 vs 4	3 vs 4
23%	63%	53%	46%	76%	55%

Πίνακας 4.2.1 – Οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις του ολικού αζώτου των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο και Οκτώβριο

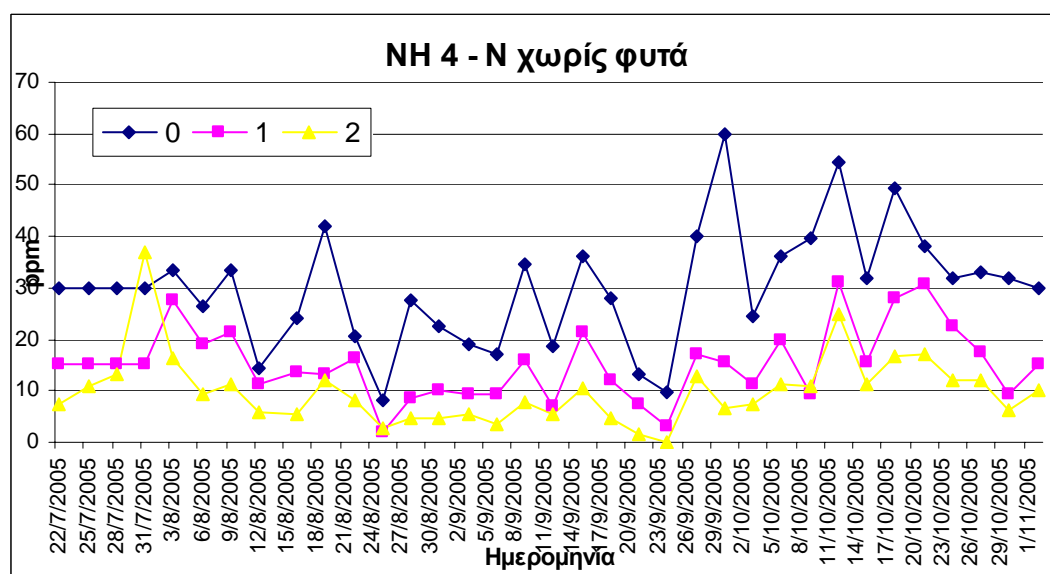
Ποσοστιαία φαίνεται ότι η γραμμή με βλάστηση απομακρύνει περισσότερο ολικό άζωτο από τη γραμμή χωρίς. Η απομάκρυνση είναι μεγαλύτερη μετά τη δεύτερη δεξαμενή από ότι στην πρώτη, αλλά ούτε μετά την πρώτη, ούτε και στην έξοδο υπάρχει σημαντική διαφορά στις συγκεντρώσεις ολικού αζώτου. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το λύμα παραμένει στη δεύτερη δεξαμενή περισσότερο χρόνο και λόγω της διάταξης της εξόδου, ευνοείται η απονιτροποίηση της αμμωνίας. Δεν πρέπει να παραβλέψουμε και τη συνεισφορά της βλάστησης στη συγκέντρωση του αζώτου η οποία προέρχεται είτε από έκκριση ουσιών από τις ρίζες, είτε από της αποδόμηση του φυλλώματος όταν αυτό πέφτει στις δεξαμενές. Από την είσοδο ως το ενδιάμεσο σημείο στη γραμμή με βλάστηση η μέση τιμή του ολικού αζώτου μειώνεται κατά 35.5 ppm. Η συγκέντρωση αυτή είναι αρκετά υψηλή για να έχει προσληφθεί από τα φυτά. Άρα είναι πιθανόν να μην εισέρχεται αρκετό οξυγόνο σε όλο το βάθος του υποστρώματος με αποτέλεσμα προς το βάθος να επικρατούν ανοξικές συνθήκες και να γίνεται απονιτροποίηση.

Αμμωνία

Τα διαγράμματα 4.2.5 και 4.2.6 παρουσιάζουν τις συγκεντρώσεις της αμμωνίας σε είσοδο, ενδιάμεσα σημεία και έξοδο για τη γραμμή με βλάστηση και για την χωρίς βλάστηση αντίστοιχα.

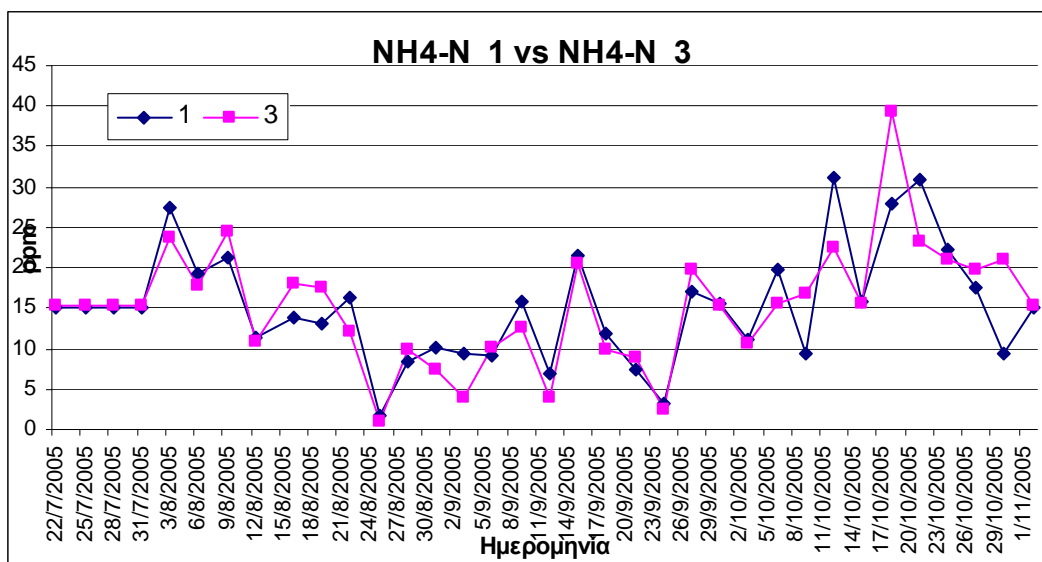


Διάγραμμα 4.2.5 – Συγκεντρώσεις αμμωνίας στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (3) και έξοδο (4).

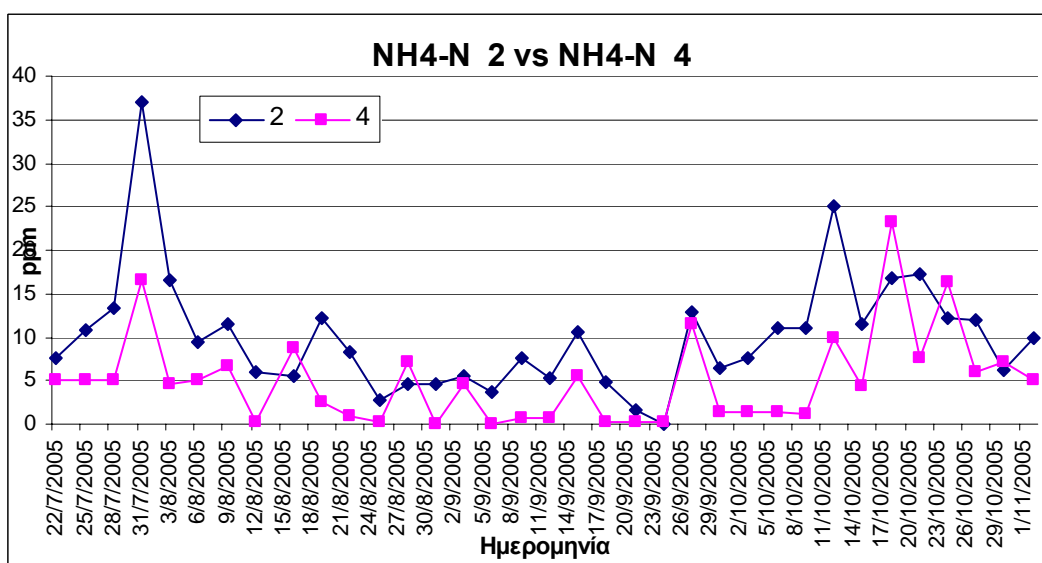


Διάγραμμα 4.2.6 – Συγκεντρώσεις αμμωνίας στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (1) και έξοδο (2).

Στα διαγράμματα 4.2.7 και 4.2.8 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.2.7 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων αμμωνίας στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή με βλάστηση (3) και στη γραμμή χωρίς (1).



Διάγραμμα 4.2.8 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων αμμωνίας στις εξόδους στη γραμμή με βλάστηση (4) και στη γραμμή χωρίς (2).

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις της αμμωνίας των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο μεταξύ εισόδου – ενδιάμεσων σημείων, ενδιάμεσων σημείων - εξόδων και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

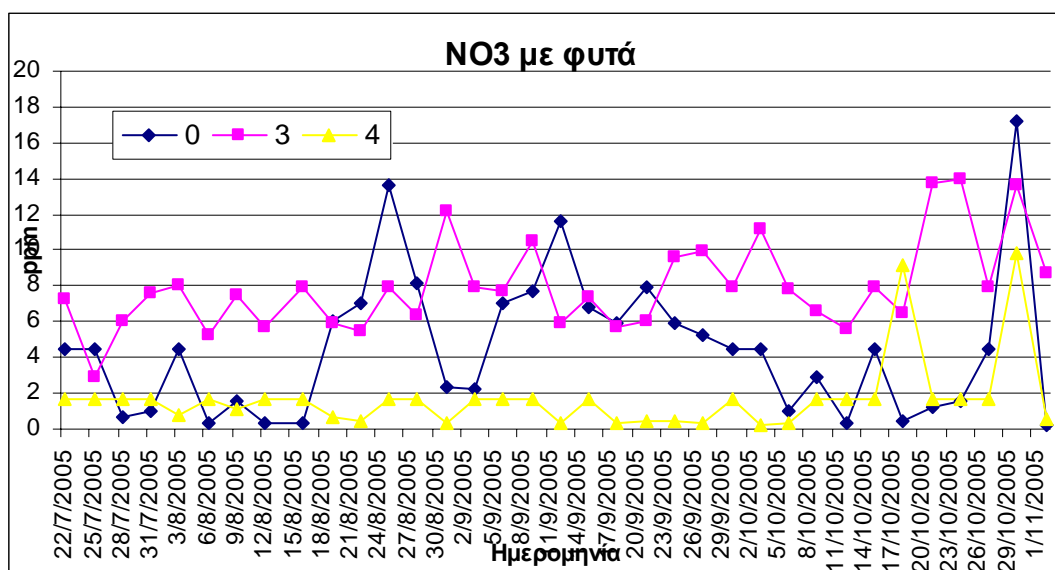
0 vs 1	0 vs 2	1 vs 2	0 vs 3	0 vs 4	3 vs 4
49%	67%	35%	49%	83%	67%

Πίνακας 4.2.2 – Οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις της αμμωνίας των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο

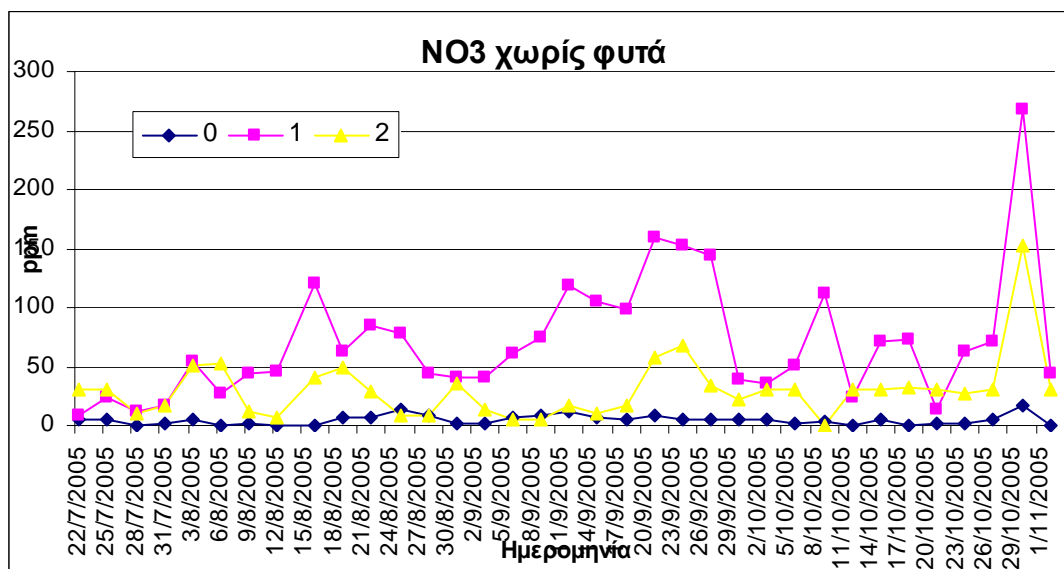
Η συμπεριφορά των δύο γραμμών στην απομάκρυνση της αμμωνίας είναι διαφορετική σε ότι αφορά την απόδοσή τους στο δεύτερο στάδιο. Υπάρχει μεγάλη διαφορά στην απομάκρυνση μεταξύ ενδιάμεσου σημείου – εξόδου και εισόδου – ενδιάμεσου σημείου, στη γραμμή με βλάστηση. Αντίθετα στη γραμμή χωρίς βλάστηση δεν υπάρχει διαφορά στην απομάκρυνση της αμμωνίας. Επίσης, αξιοσημείωτη είναι η σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία, καθώς από το διάγραμμα 4.2.7 προκύπτει ότι η συμπεριφορά των δύο γραμμών είναι η ίδια, σε ότι αφορά την απόδοσή τους στο πρώτο στάδιο, καθώς οι συγκεντρώσεις σχεδόν ταυτίζονται.

Νιτρικά

Στα διαγράμματα 4.2.9 και 4.2.10 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των νιτρικών σε είσοδο, ενδιάμεσα σημεία και έξοδο για τη γραμμή με βλάστηση και για την χωρίς βλάστηση αντίστοιχα.

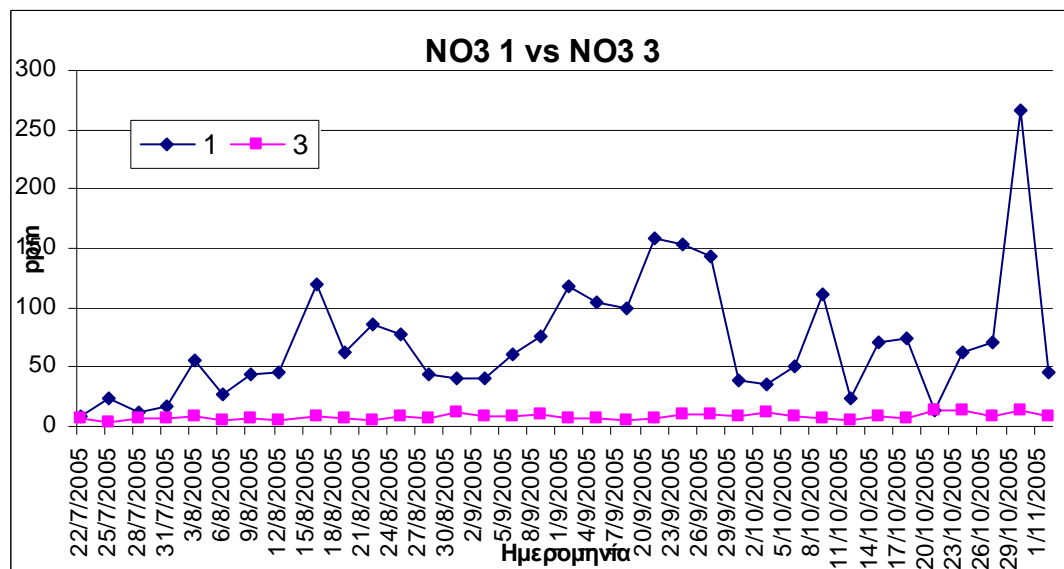


Διάγραμμα 4.2.9 - Συγκεντρώσεις νιτρικών στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (3) και έξοδο (4).

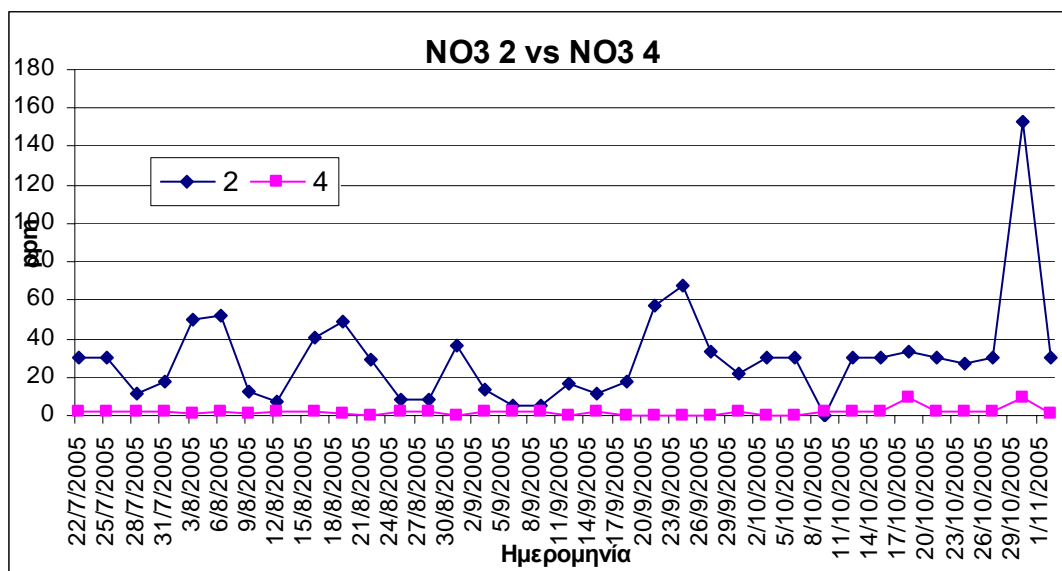


Διάγραμμα 4.2.10 - Συγκεντρώσεις νιτρικών στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (1) και έξοδο (2)

Στα διαγράμματα 4.2.11 και 4.2.12 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.2.11 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων νιτρικών στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή με βλάστηση (3) και στη γραμμή χωρίς (1).

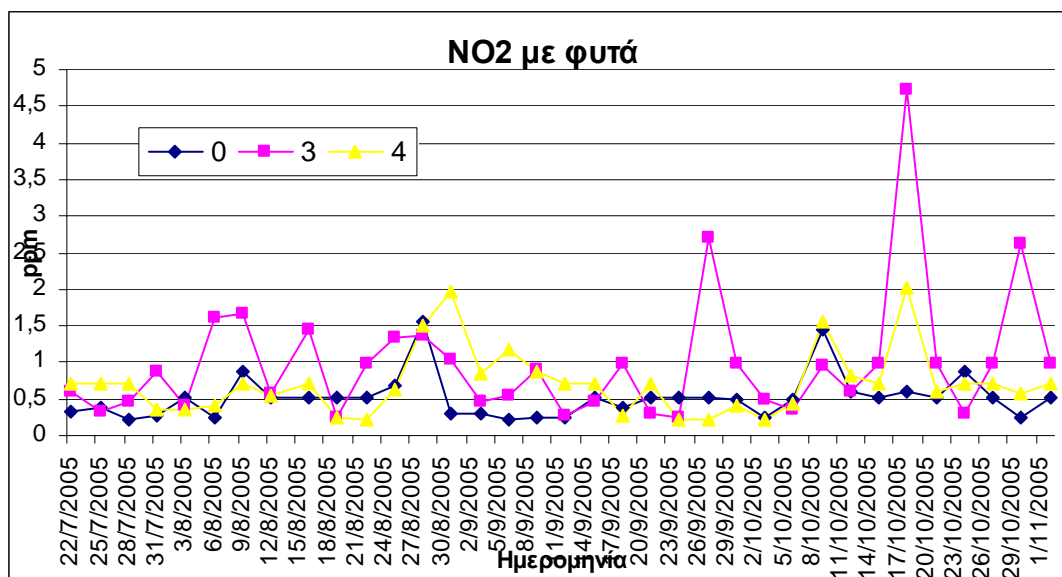


Διάγραμμα 4.2.12 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων νιτρικών στις εξόδους στη γραμμή με βλάστηση (4) και στη γραμμή χωρίς (2)

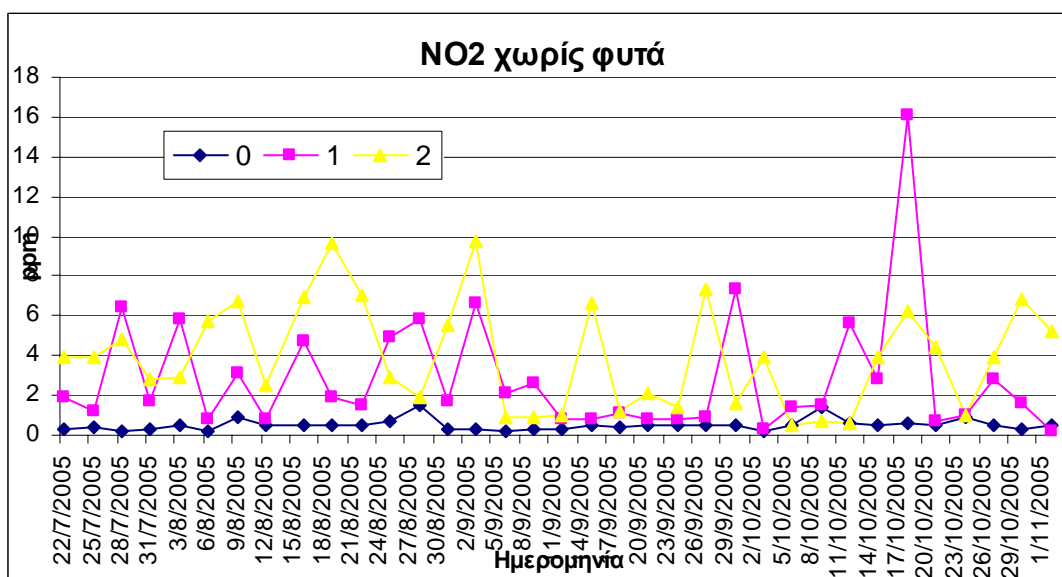
Από τα διαγράμματα των νιτρικών μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τόσο στα ενδιάμεσα σημεία, όσο και στις εξόδους, η γραμμή χωρίς βλάστηση έχει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Η μέση τιμή των νιτρικών στο ενδιάμεσο σημείο της γραμμής χωρίς βλάστηση είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση στην άλλη γραμμή. Η διαφορά αυτή στις συγκεντρώσεις, ίσως να σημαίνει ότι στο πρώτο στάδιο της γραμμής χωρίς βλάστηση να γίνεται μεταφορά οξυγόνου στο υπόστρωμα με μεγαλύτερο ρυθμό. Επιπλέον, το γεγονός ότι στην γραμμή με βλάστηση οι συγκεντρώσεις των νιτρικών είναι στην πλειοψηφία τους κοντά στο μηδέν, δείχνει ότι η απονιτροποίηση γίνεται σε ικανοποιητικό βαθμό.

Νιτρώδη

Στα διαγράμματα 4.2.13 και 4.2.14 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των νιτρωδών σε είσοδο, ενδιάμεσα σημεία και έξοδο για τη γραμμή με βλάστηση και για την χωρίς βλάστηση αντίστοιχα.

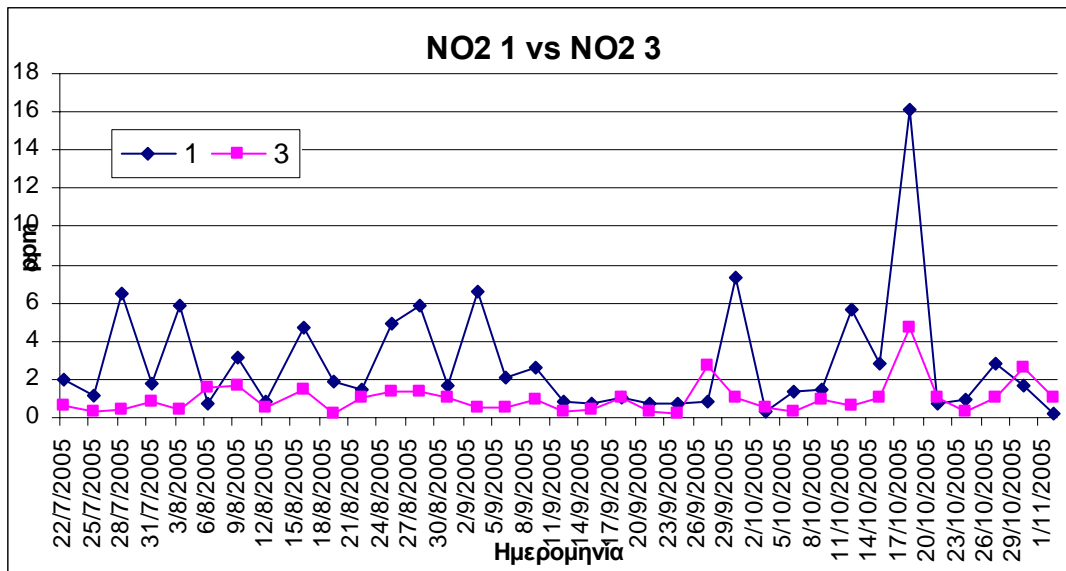


Διάγραμμα 4.2.13 - Συγκεντρώσεις νιτρωδών στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (3) και έξοδο (4).

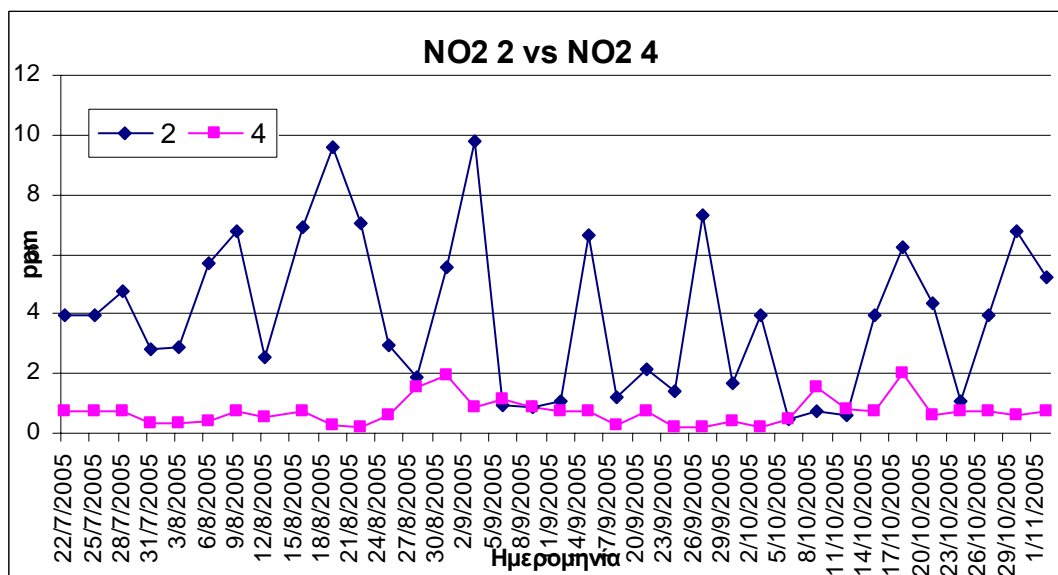


Διάγραμμα 4.2.14 - Συγκεντρώσεις νιτρωδών στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (1) και έξοδο (2)

Στα διαγράμματα 4.2.15 και 4.2.16 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.2.15 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων νιτρωδών στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή με βλάστηση (3) και στη γραμμή χωρίς (1).

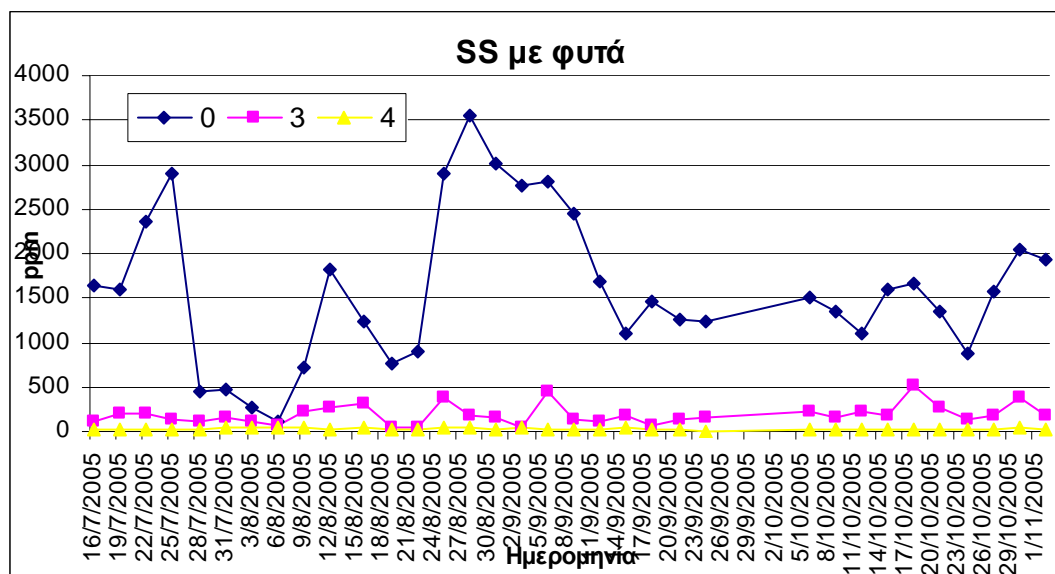


Διάγραμμα 4.2.16 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων νιτρωδών στις εξόδους στη γραμμή με βλάστηση (4) και στη γραμμή χωρίς (2)

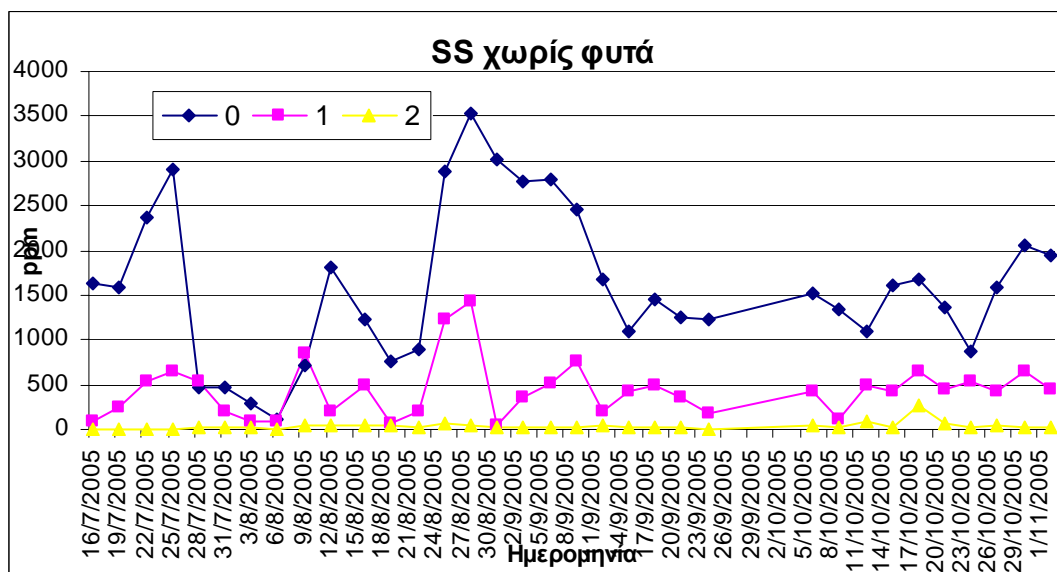
Για τα νιτρώδη δεν ισχύει κάτι το διαφορετικό σε σχέση με την διακύμανση των συγκεντρώσεων τους στα ενδιάμεσα σημεία και στην έξοδο. Αξιοσημείωτο είναι, ότι στη γραμμή με βλάστηση στην έξοδο, η μέση συγκέντρωση τους είναι κοντά στο όριο ανίχνευσης, τα 0.2 ppm.

4.3 Αιωρούμενα στερεά

Στα διαγράμματα 4.3.1 και 4.3.2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών σε είσοδο, ενδιάμεσα σημεία και έξοδο για τη γραμμή με βλάστηση και για την χωρίς βλάστηση αντίστοιχα.

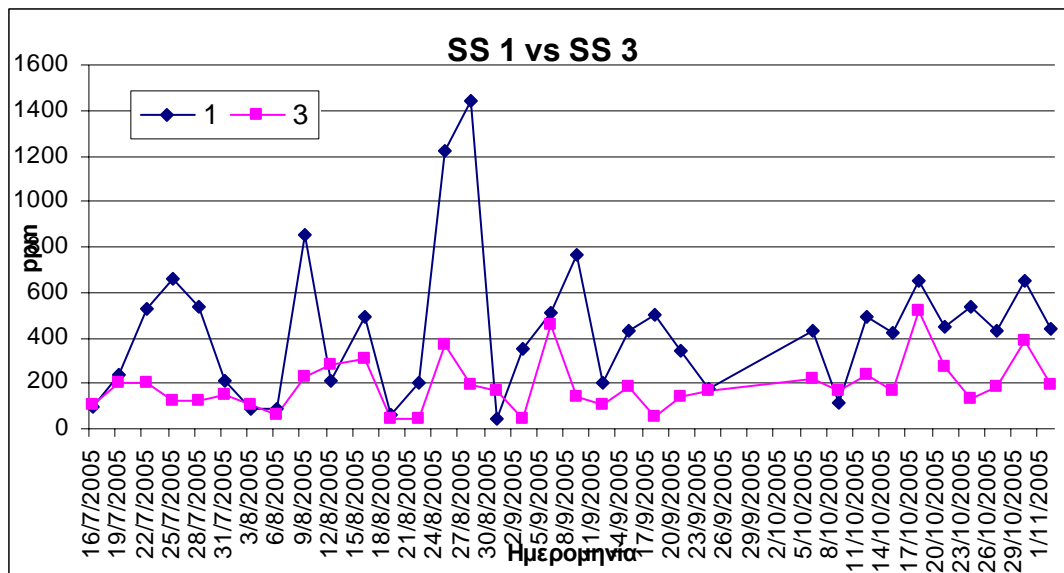


Διάγραμμα 4.3.1 - Συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (3) και έξοδο (4).

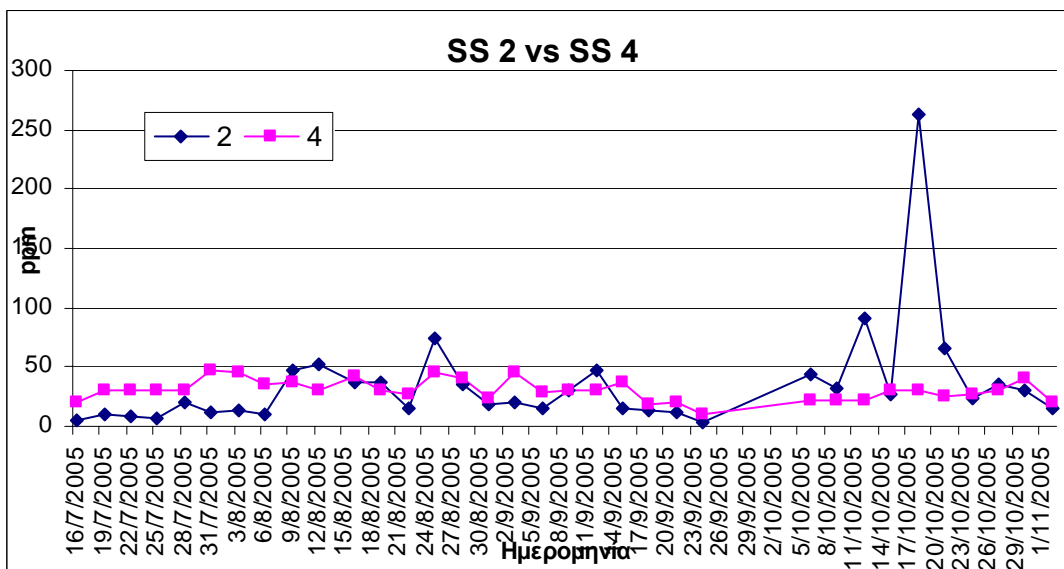


Διάγραμμα 4.3.2 - Συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (1) και έξοδο (2)

Στα διαγράμματα 4.3.3 και 4.3.4 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.3.3 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή με βλάστηση (3) και στη γραμμή χωρίς (1).



Διάγραμμα 4.3.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών στις εξόδους στη γραμμή με βλάστηση (4) και στη γραμμή χωρίς (2)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις των αιωρούμενων στερεών των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο μεταξύ εισόδου – ενδιάμεσων σημείων, ενδιάμεσων σημείων - εξόδων και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

0 vs 1	0 vs 2	1 vs 2	0 vs 3	0 vs 4	3 vs 4
73%	98%	92%	88%	98%	84%

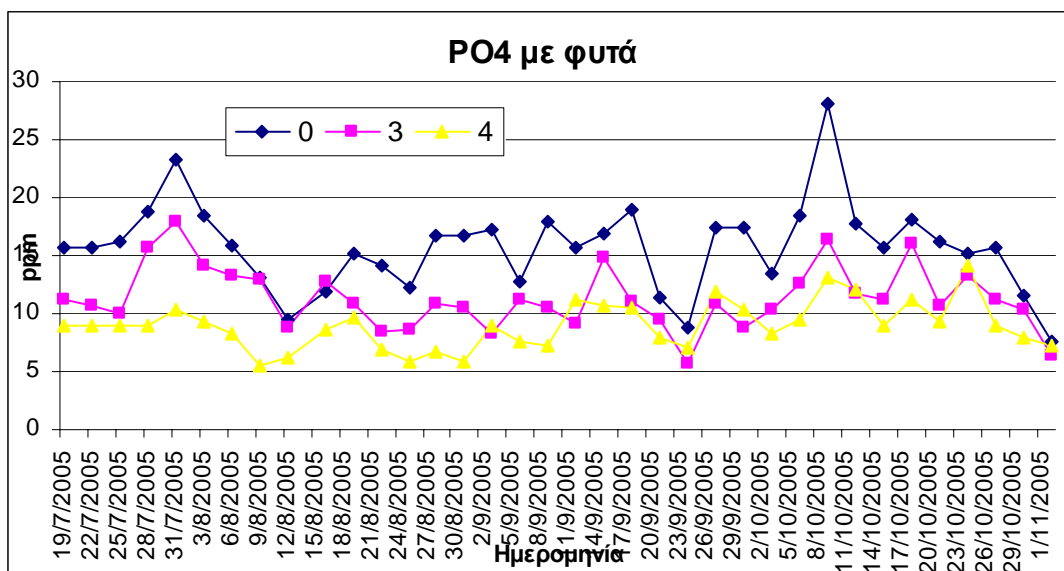
Πίνακας 4.3.1 – Οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις των αιωρούμενων στερεών των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο

Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από τη διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στην είσοδο, η τελική εκροή είναι σχεδόν πάντα σταθερή και στις δυο γραμμές, και σε αρκετά χαμηλά επίπεδα. Το σύστημα παρουσιάζει εξαιρετική απόδοση σε ότι αφορά την απομάκρυνση στερεών και από τις δύο γραμμές, με την γραμμή με βλάστηση να έχει ελαφρώς μικρότερη μέση συγκέντρωση. Η απομάκρυνση που λάμβανε χώρα ήταν μεγαλύτερη κατά το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας και οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις των αιωρούμενων στερεών ήταν από τις μεγαλύτερες που παρατηρήθηκαν από όλες τις παραμέτρους που μετρήθηκαν.

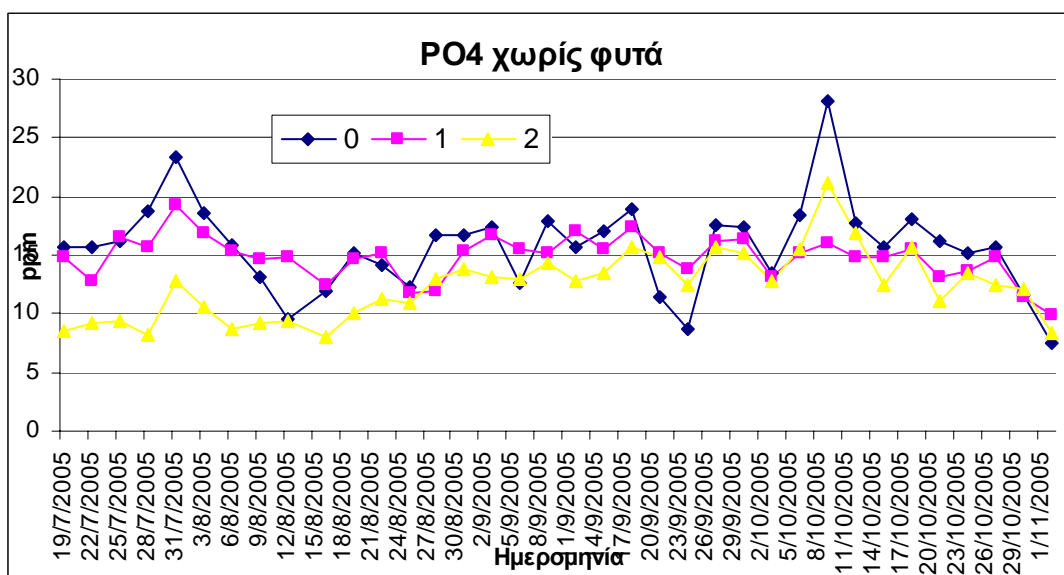
4.4 Ανιόντα

Φωσφορικά

Στα διαγράμματα 4.4.1 και 4.4.2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των φωσφορικών σε είσοδο, ενδιάμεσα σημεία και έξοδο για τη γραμμή με βλάστηση και για την χωρίς βλάστηση αντίστοιχα.

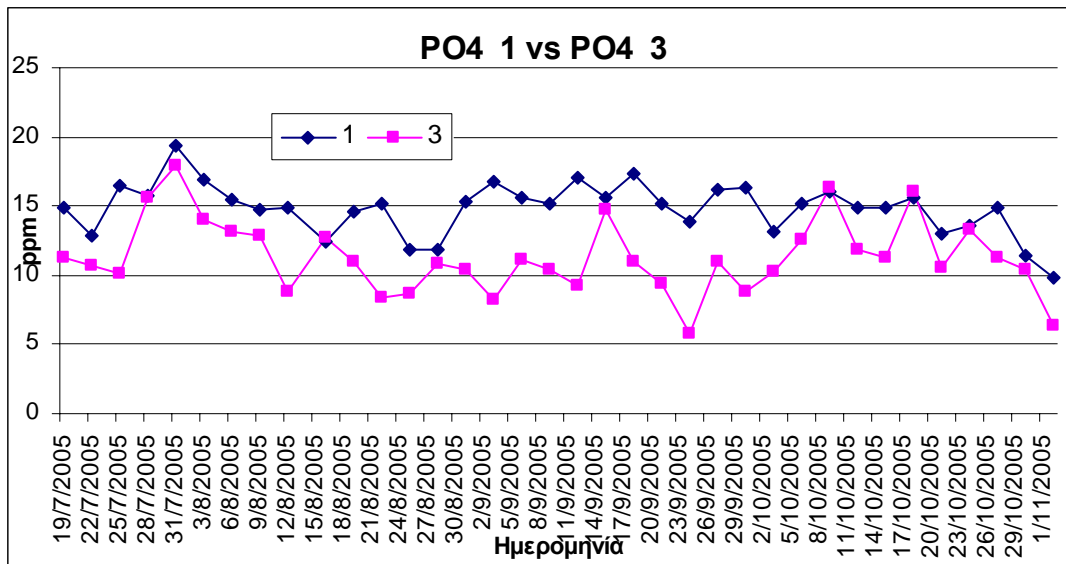


Διάγραμμα 4.4.1 - Συγκεντρώσεις φωσφορικών στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (3) και έξοδο (4).

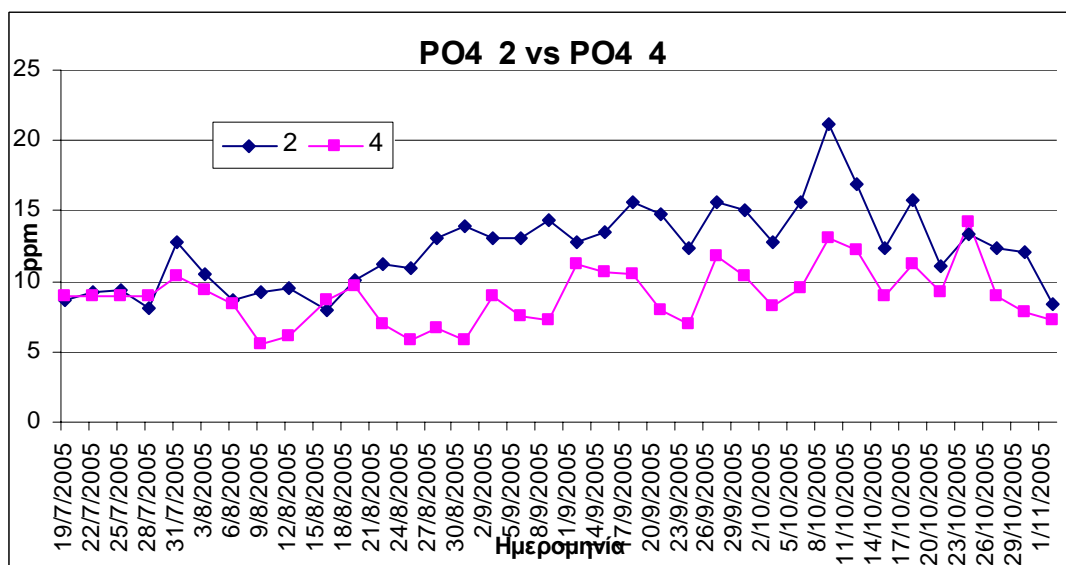


Διάγραμμα 4.4.2 - Συγκεντρώσεις φωσφορικών στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (1) και έξοδο (2)

Στα διαγράμματα 4.4.3 και 4.4.4 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.4.3 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων φωσφορικών στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή με βλάστηση (3) και στη γραμμή χωρίς (1).



Διάγραμμα 4.4.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων φωσφορικών στις εξόδους στη γραμμή με βλάστηση (4) και στη γραμμή χωρίς (2)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις των φωσφορικών των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο μεταξύ εισόδου – ενδιάμεσων σημείων, ενδιάμεσων σημείων - εξόδων και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

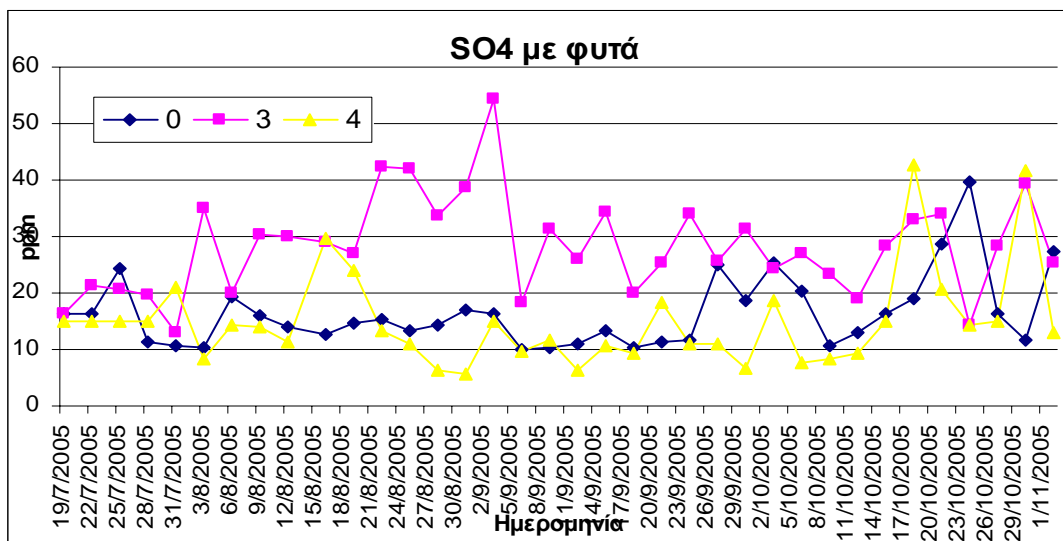
0 vs 1	0 vs 2	1 vs 2	0 vs 3	0 vs 4	3 vs 4
6%	21%	14%	28%	43%	20%

Πίνακας 4.4.1 – Οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις των φωσφορικών των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο

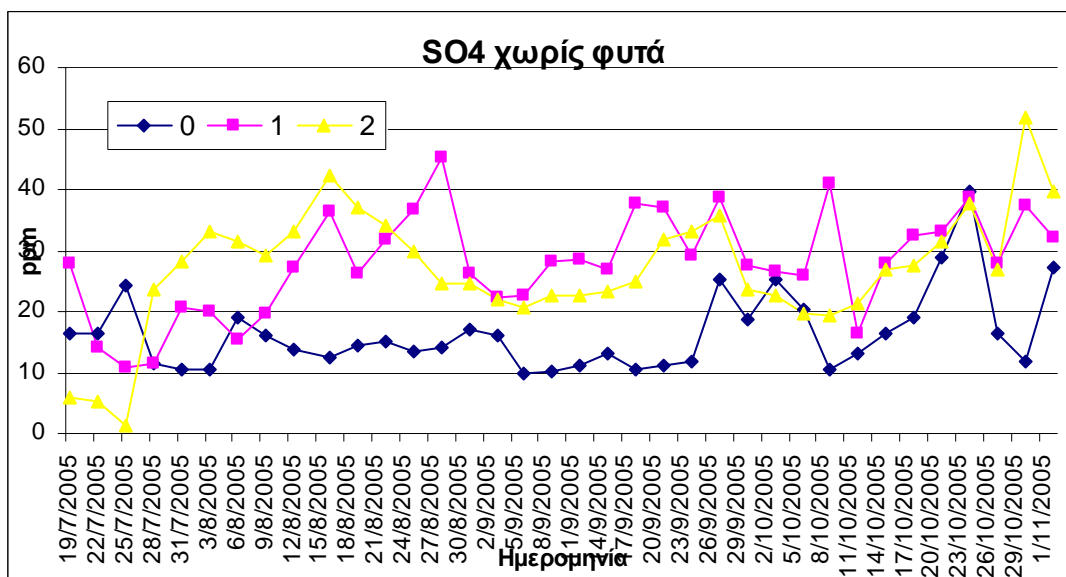
Τα ποσοστά απομάκρυνσης των φωσφορικών από το σύστημα, είναι τα χαμηλότερα που παρατηρούνται, 43% για τη γραμμή με βλάστηση και μόλις 21% για τη γραμμή χωρίς βλάστηση. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι, στη γραμμή με βλάστηση η απομάκρυνση των φωσφορικών είναι μεγαλύτερη στη δεύτερη δεξαμενή και όχι στην πρώτη, αν και η πρώτη δεξαμενή έχει για υπόστρωμα, μόνο χαλίκι. Αυτό, ίσως να οφείλεται στο μικρό χρόνο παραμονής του λύματος στην πρώτη δεξαμενή ή ίσως στο ότι η δεύτερη δεξαμενή με τη χαλαζιακή άμμο να δινόταν η ευκαιρία στα καλάμια να προσλαμβάνουν περισσότερα φωσφορικά και έτσι να εξηγείται η μεγαλύτερη ανάπτυξή τους. Επίσης, δεν αποκλείεται τα θειικά να ανταγωνίζονται τα φωσφορικά ιόντα στη διεργασία της προσρόφησης.

Θειικά

Στα διαγράμματα 4.4.5 και 4.4.6 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των θεικών σε είσοδο, ενδιάμεσα σημεία και έξοδο για τη γραμμή με βλάστηση και για την χωρίς βλάστηση αντίστοιχα.

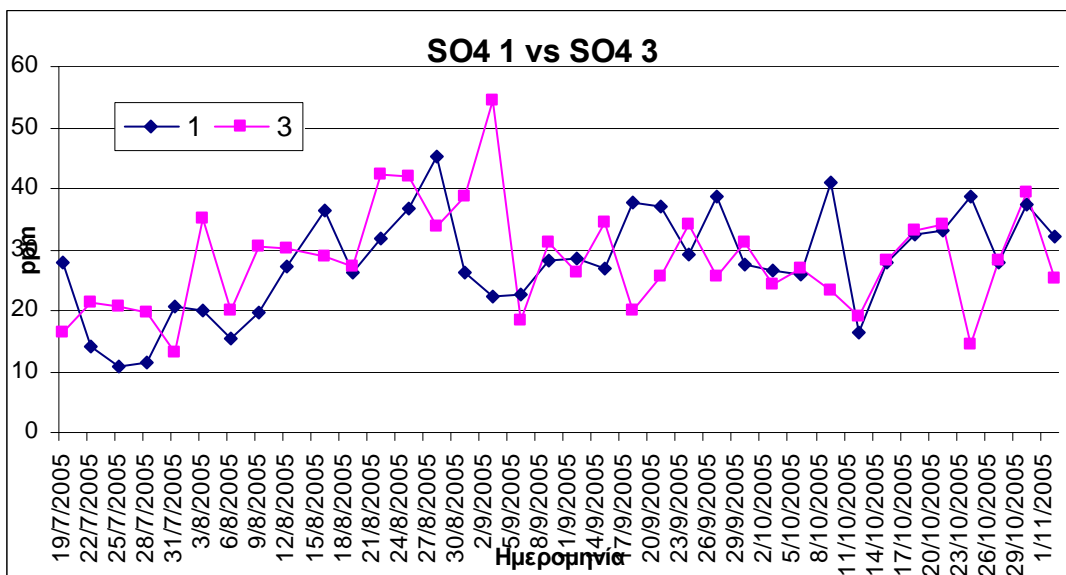


Διάγραμμα 4.4.5 - Συγκεντρώσεις θεικών στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (3) και έξοδο (4).

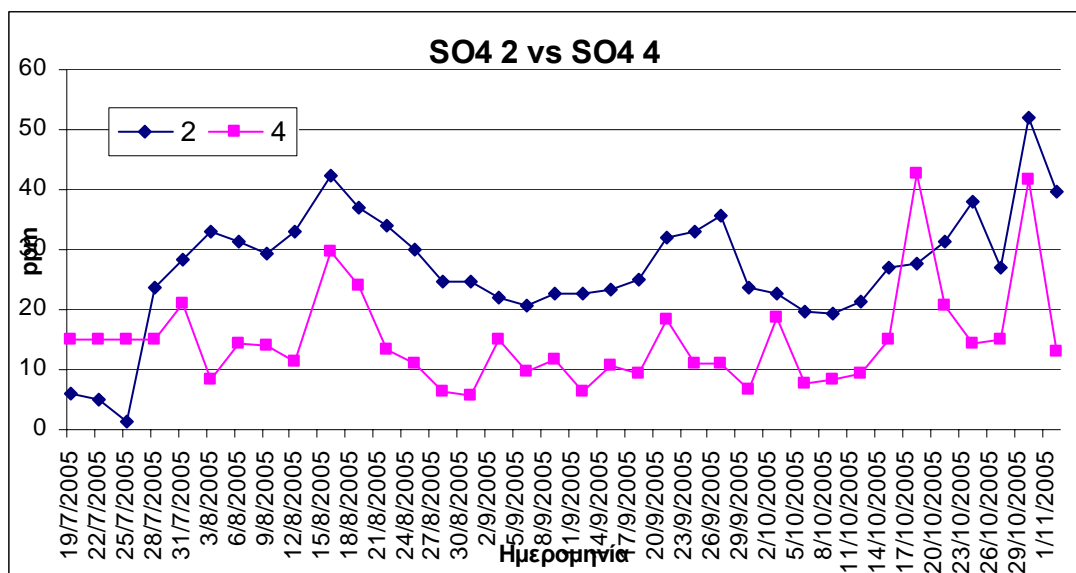


Διάγραμμα 4.4.6 - Συγκεντρώσεις θεικών στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (1) και έξοδο (2)

Στα διαγράμματα 4.4.7 και 4.4.8 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.4.7 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων θεικών στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή με βλάστηση (3) και στη γραμμή χωρίς (1).

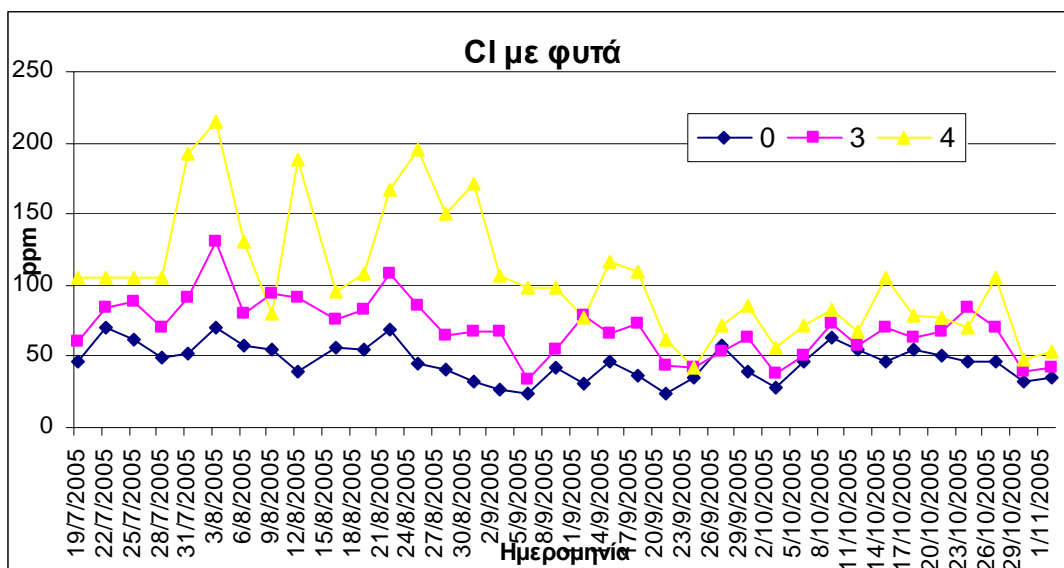


Διάγραμμα 4.4.8 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων θεικών στις εξόδους στη γραμμή με βλάστηση (4) και στη γραμμή χωρίς (2)

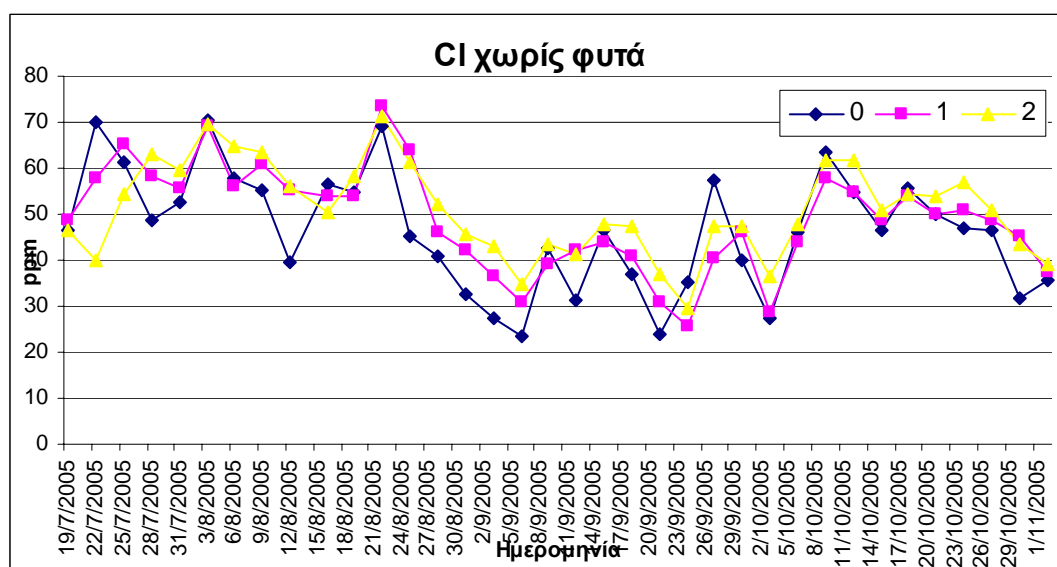
Οι συγκεντρώσεις των θεικών μειώνονται μόνο στο δεύτερο στάδιο και στις δυο δεξαμενές οι οποίες είχαν και παρόμοιες μέσες τιμές. Ο πιο πιθανός μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η χρήση τους ως δέκτες ηλεκτρονίων από τους αναερόβιους μικροοργανισμούς. Δεν αποκλείεται να προσροφόνται από το υπόστρωμα όπως τα φωσφορικά.

Χλώριο

Στα διαγράμματα 4.4.9 και 4.4.10 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του χλωρίου σε είσοδο, ενδιάμεσα σημεία και έξοδο για τη γραμμή με βλάστηση και για την χωρίς βλάστηση αντίστοιχα.

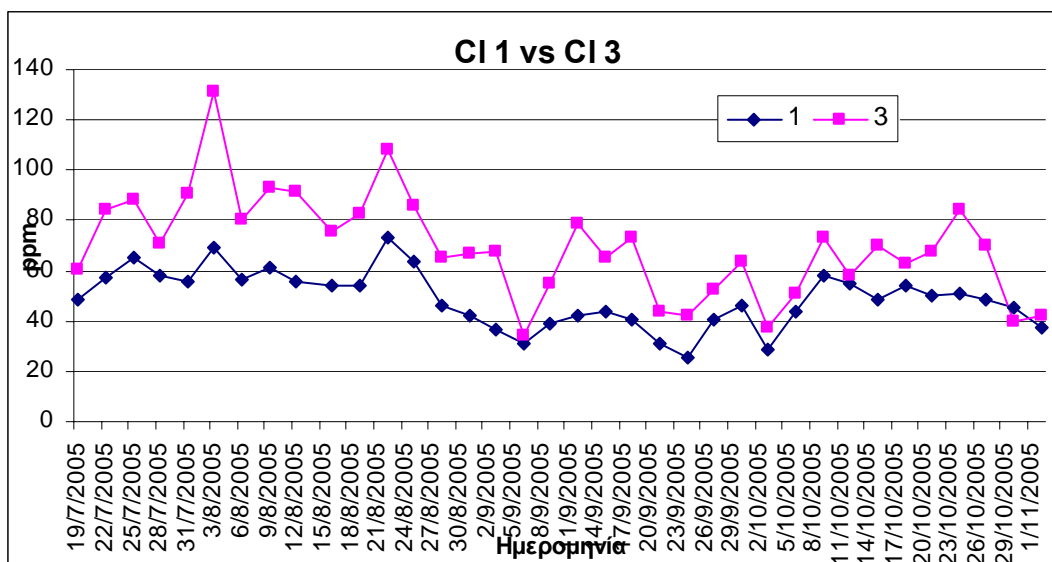


Διάγραμμα 4.4.9 - Συγκεντρώσεις χλωρίου στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (3) και έξοδο (4).

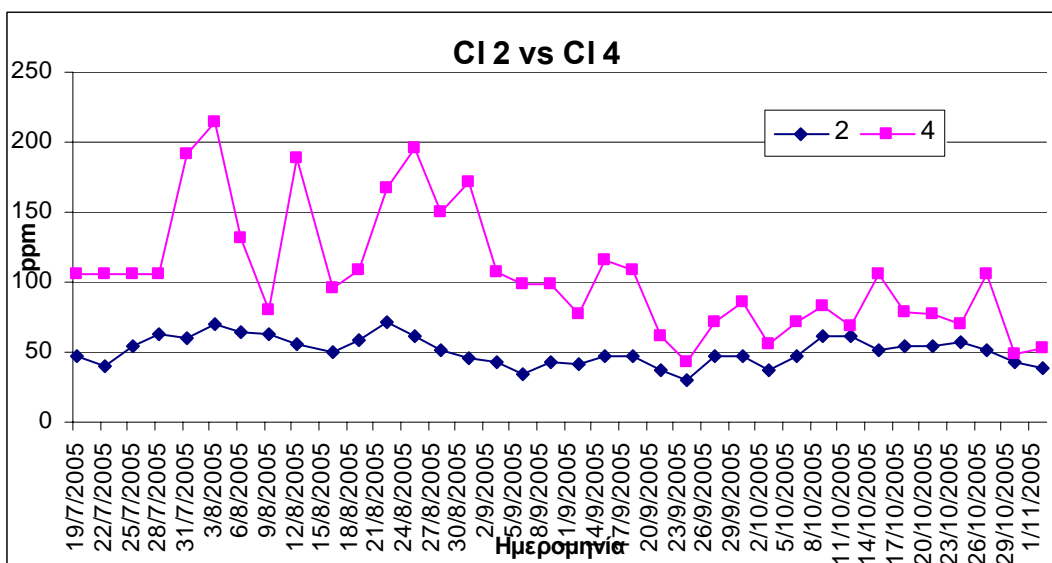


Διάγραμμα 4.4.10 - Συγκεντρώσεις χλωρίου στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (1) και έξοδο (2)

Στα διαγράμματα 4.4.11 και 4.4.12 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.4.11 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων χλωρίου στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή με βλάστηση (3) και στη γραμμή χωρίς (1).



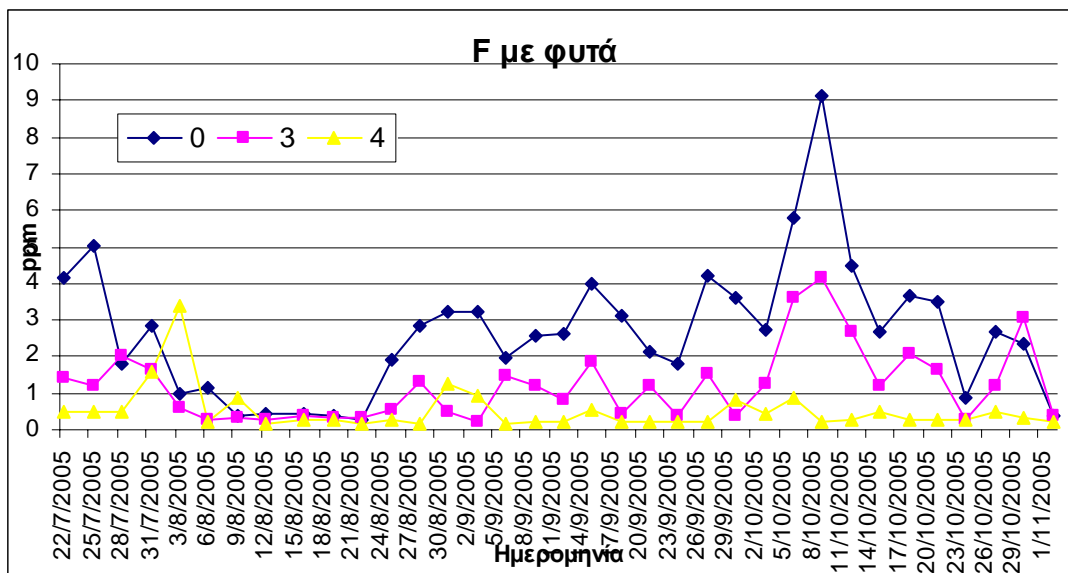
Διάγραμμα 4.4.12 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων χλωρίου στις εξόδους στη γραμμή με βλάστηση (4) και στη γραμμή χωρίς (2)

Από τα διαγράμματα, παρατηρούμε ότι στη γραμμή με τα φυτά παρουσιάζεται μια αύξηση της συγκέντρωσης του χλωρίου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ προς το φθινόπωρο τείνει να σταθεροποιηθεί στα 50 ppm. Αντίθετα η γραμμή χωρίς βλάστηση παρουσιάζει μία σταθερή συμπεριφορά στη είσοδο, στην ενδιάμεση κατάσταση αλλά και

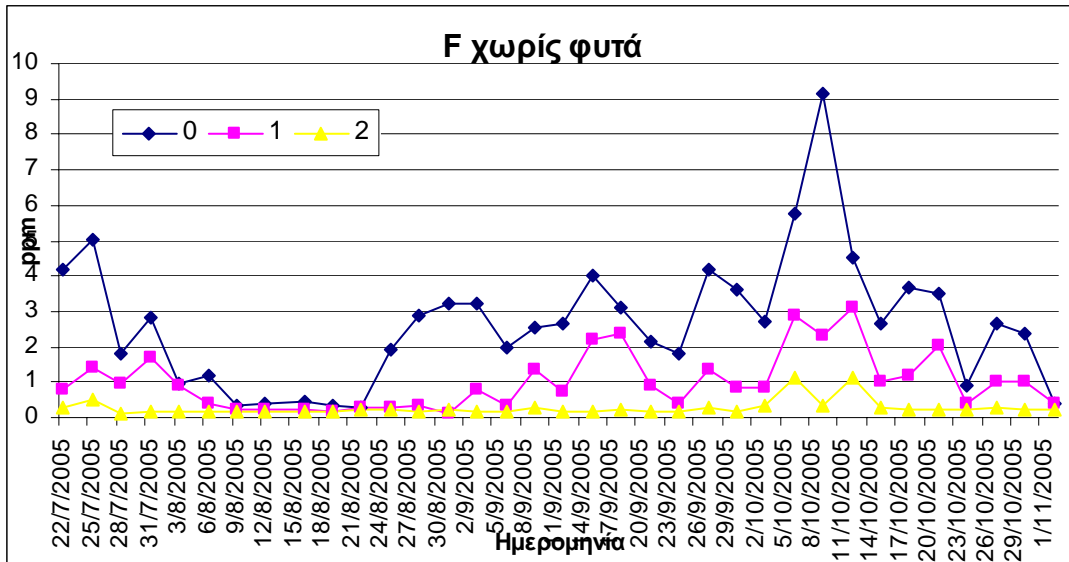
στην έξοδο. Από την σύγκριση των δύο ενδιάμεσων σημείων προκύπτει μια ομοιόμορφη συμπεριφορά, ενώ στις δύο εξόδους και προς τις αρχές Νοεμβρίου, η τιμή της συγκέντρωσης του χλωρίου και στις δυο γραμμές τείνει να σταθεροποιηθεί στα 50 ppm.

Φθόριο

Στα διαγράμματα 4.4.13 και 4.4.14 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του φθορίου σε είσοδο, ενδιάμεσα σημεία και έξοδο για τη γραμμή με βλάστηση και για την χωρίς βλάστηση αντίστοιχα.

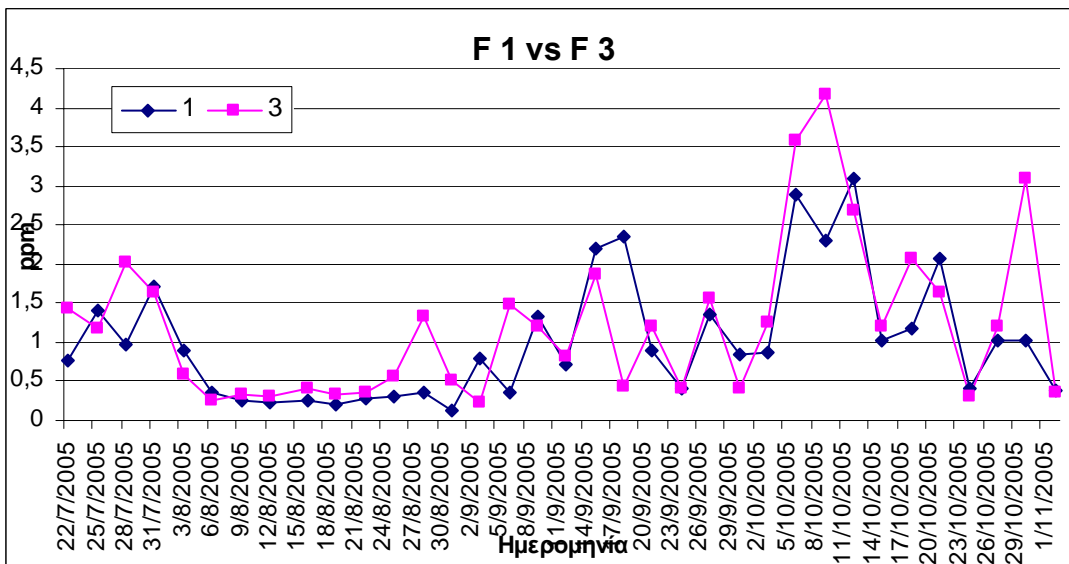


Διάγραμμα 4.4.13 - Συγκεντρώσεις φθορίου στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (3) και έξοδο (4).

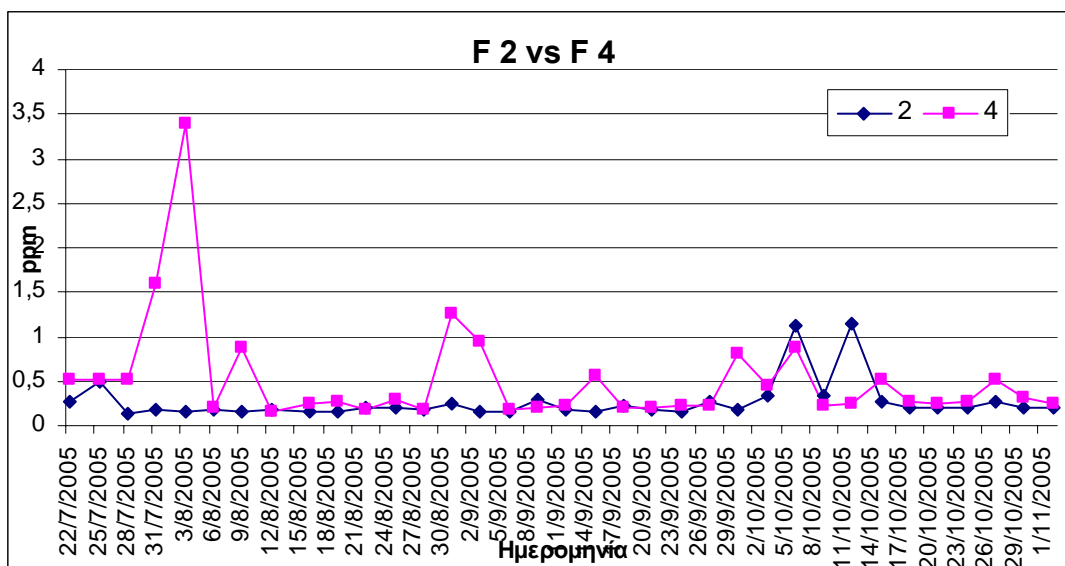


Διάγραμμα 4.4.14 - Συγκεντρώσεις φθορίου στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (0), ενδιάμεσο σημείο (1) και έξοδο (2)

Στα διαγράμματα 4.4.15 και 4.4.16 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.4.15 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων φθορίου στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή με βλάστηση (3) και στη γραμμή χωρίς (1).



Διάγραμμα 4.4.16 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων φθορίου στις εξόδους στη γραμμή με βλάστηση (4) και στη γραμμή χωρίς (2)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις του φθορίου των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο μεταξύ εισόδου – ενδιάμεσων σημείων, ενδιάμεσων σημείων - εξόδων και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

0 vs 1	0 vs 2	1 vs 2	0 vs 3	0 vs 4	3 vs 4
62%	90%	74%	55%	80%	57%

Πίνακας 4.4.2 – Οι επί τοις εκατό απομακρύνσεις του φθορίου των μέσων τιμών για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο

Από τα παραπάνω, είναι εμφανής η απομάκρυνσή του φθορίου και στις δυο γραμμές και συγκεκριμένα στο δεύτερο στάδιο. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία του απατίτη. Λόγω της ύπαρξης ανθρακικού ασβεστίου στο υπόστρωμα, το φθόριο αντιδρά και δημιουργεί μια ένωση που ονομάζεται απατίτης $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ [17][18]. Πιο συγκεκριμένα στη γραμμή με τη βλάστηση επιτυγχάνεται ποσοστό απομάκρυνσης 80% ενώ στη γραμμή χωρίς βλάστηση το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 90%. Ενώ οι τιμές των συγκεντρώσεων του φθορίου στα δύο ενδιάμεσα σημεία είναι παρόμοιες, στις δύο εξόδους διαφοροποιούνται. Στη γραμμή χωρίς βλάστηση οι τιμές αυτές σταθεροποιούνται στα 0.3 ppm ενώ στη γραμμή με βλάστηση προς τις αρχές Νοεμβρίου σταθεροποιείται στα 0.5 ppm.

4.5 Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

Από τις εργαστηριακές μετρήσεις που γίνανε, είχαμε μια εικόνα της εξατμισοδιαπνοής που λάμβανε χώρα. Γνωρίζαμε τον αρχικό όγκο που έμπαινε σε κάθε γραμμή (60 λίτρα την ημέρα) και τον όγκο που έβγαινε από κάθε γραμμή. Οπότε από τη γραμμή χωρίς βλάστηση υπολογίζαμε τον όγκο που εξατμιζότανε και από την γραμμή με βλάστηση τον πραγματικό όγκο που λαμβάνανε τα φυτά. Παραδείγματος χάριν, η τροφοδοσία ήταν 60 λίτρα την ημέρα για κάθε γραμμή. Η γραμμή χωρίς βλάστηση είχε έξοδο 40 λίτρα, οπότε τα 20 λίτρα εξατμιζόταν, και η γραμμή με βλάστηση είχε έξοδο 30 λίτρα, 20 λίτρα που εξατμιζόταν και τα υπόλοιπα 10 που λαμβάνανε τα φυτά. Σύμφωνα με τα παραπάνω, μια αρχική εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής (σε λίτρα) που λάμβανε χώρα για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο είναι :

	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος
Είσοδος	600	600	480
Εκροή στη γραμμή χωρίς βλάστηση	422.5	455.5	416.5
Εξάτμιση στη γραμμή χωρίς βλάστηση	177.5	144.5	63.5
Εκροή στη γραμμή με βλάστηση	222.5	223	211
Εξατμισοδιαπνοή στη γραμμή με βλάστηση	377.5	377	269
Ανάγκες φυτών	200	232.5	123.5

Με βάση τα παραπάνω, θέλαμε να συγκρίνουμε τις εργαστηριακές τιμές, με κάποιο μοντέλο της εξατμισοδιαπνοής για να δούμε κατά πόσο οι τιμές αυτές συγκλίνουν η όχι. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά μοντέλα που περιγράφουν το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής, μόνο που απαιτούν αρκετά μετεωρολογικά δεδομένα, και εμπεριέχουν αρκετές σταθερές που προκύπτουν από εμπειρικούς κανόνες.

Μοντέλο Thornthwaite

Ο Thornthwaite (1948) περιέγραψε την βιολογική και φυσική σημασία της εξατμισοδιαπνοής στην κλιματική ταξινόμηση και ανέπτυξε μια εξίσωση για την εκτίμηση της ET_p . [17] Η μέθοδος Thornthwaite για την εκτίμηση μηνιαίων τιμών της ET_p δίνεται από τη σχέση

$$ET_p = 16 \left(\frac{I_1}{12} \right) \cdot \left(\frac{10T_i}{I} \right)^a \cdot \left(\frac{N}{30} \right)$$

όπου

- ET_p : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm/μήνα)
 I_1 : οι πραγματικές ώρες της ημέρας (hr) (δίνονται σε πίνακες)
 T_i : η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα (°C)
 N : ο αριθμός των ημερών του μήνα
 a : μια εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από τον δείκτη I

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49$$

I : είναι ένας δείκτης θερμότητας που αποτελεί το άθροισμα των 12 μηνιαίων τιμών

($I = \sum_{i=1}^{12} i$) και υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$i = \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

Έχοντας τις τιμές της θερμοκρασίας για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο και αντικαθιστώντας στις εξισώσεις του μοντέλου προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα (το μοντέλο δίνει τις τιμές σε mm/month, οπότε τις μετατρέψαμε σε όγκους αφού γνωρίζουμε τις διαμέτρους των βαρελιών) :

	Τιμές μοντέλου Thornthwaite	Τιμές Εργαστηρίου	Διαφορά
Αύγουστος	72.8	377.5	304.7
Σεπτέμβριος	52.3	377	324.7
Οκτώβριος	31.2	269	237.8

Από ότι παρατηρούμε το μοντέλο δεν συγκλίνει καθόλου με τις τιμές του εργαστηρίου και αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, αφού η υπολογιζόμενη ET υποεκτιμάται, όταν η ακτινοβολία που

προσλαμβάνει η γη έχει τη μέγιστη τιμή της (στη διάρκεια του καλοκαιριού). Αυτό αποδίδεται από πολλούς ερευνητές [Van Wijk and D.A. Devries (1954), Pelton et al (1960)] στη χρονική υστέρηση που παρουσιάζει η ετήσια πορεία της θερμοκρασίας ως προς την ακτινοβολία. Μεγάλη υποεκτίμηση της ET με αυτή τη μέθοδο διαφαίνεται στα ξηρά και ημίξηρα κλίματα (Pruit and Doorenbos, 1977). Επίσης, η χρησιμοποίηση της μεθόδου για μικρά χρονικά διαστήματα οδηγεί πολλές φορές σε σοβαρά λάθη επειδή η μέση θερμοκρασία μικρών χρονικών περιόδων δεν αποτελεί κατάλληλο μέτρο της εισερχόμενης ακτινοβολίας (Pelton et al , 1960). Η μέθοδος είναι επιτυχής για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα κι αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τόσο η θερμοκρασία, όσο και η ET είναι όμοιες συναρτήσεις της καθαρής ακτινοβολίας και ως εκ τούτου αυτοσυσχετίζονται όταν οι θεωρούμενες χρονικές περίοδοι είναι μεγάλες. [16]

Μοντέλο Hargreaves

Το μοντέλο Hargreaves αποτελεί μια εμπειρική μέθοδο εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς, που απαιτεί μόνο θερμοκρασιακά δεδομένα [19]. Η μέθοδος βασίζεται στην απλή εξίσωση :

$$E_{rc} = 0.0023(S_0 / \lambda)(T_a + 17.8)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$$

όπου :

E_{rc} : η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς

S_0 : Η εξωγήινη ακτινοβολία

λ : Η λανθάνουσα θερμοκρασία του αέρα

T_a : Η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα

$T_{\max} - T_{\min}$: Η διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα στην παραπάνω σχέση για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα σε λίτρα :

	Τιμές μοντέλου Hargreaves	Τιμές Εργαστηρίου	Διαφορά
Αύγουστος	82.2	377.5	295.3
Σεπτέμβριος	65.6	377	311.4
Οκτώβριος	47.5	269	221.5

Μοντέλο Blaney – Criddle

Η μέθοδος Blaney – Criddle έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε πολλές χώρες και ειδικότερα στην Ελλάδα για της εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών. Στην αρχική της μορφή, εκτιμά τη μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή μιας καλλιέργειας, με βάση την

ακόλουθη απλή σχέση, η οποία έχει μοναδικό μετεωρολογικό δεδομένο εισόδου τη θερμοκρασία [19] :

$$E_p = 0.254k_c p(32 + 1.8T_a)$$

όπου :

E_p : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή

T_a : Η μέση μηνιαία θερμοκρασία

k_c : Συντελεστής κατανάλωσης χρήσης (φυτικός συντελεστής) και εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας

p : Το ποσοστό (%) των ωρών ημέρας του συγκεκριμένου μήνα σε σχέση με το σύνολο των ωρών ημέρας του έτους

Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται από τη σχέση :

$$p = 100x \frac{Nx\mu}{365x12}$$

Όπου :

N : Η μέση αστρονομική διάρκεια ημέρας

μ : Ο αριθμός των ημερών του συγκεκριμένου μήνα

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα στην παραπάνω σχέση για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα σε λίτρα :

	Τιμές μοντέλου Blaney – Criddle	Τιμές Εργαστηρίου	Διαφορά
Αύγουστος	122.5	377.5	255
Σεπτέμβριος	102.1	377	274.9
Οκτώβριος	85	269	184

Μοντέλο Doorenbos and Pruitt

Μια πιο εξελιγμένη μορφή της εξίσωσης Blaney – Criddle είναι το μοντέλο Doorenbos and Pruitt [19]. Το μοντέλο αυτό, εκτιμά την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς και γράφεται :

$$E_p = a_{BC} + b_{BC} \left[0.254 p (32 + 1.8 T_a) \right]$$

με

$$a_{BC} = 0.43 U_{\min} - n / N - 1.41$$

$$b_{BC} = 0.82 - 0.41 U_{\min} + 1.07 n / N + 0.066 u - 0.6 U_{\min} n / N - 0.06 U_{\min} u$$

Όπου :

n/N : Η σχετική ηλιοφάνεια

U_{\min} : Η ελάχιστη ημερήσια σχετική υγρασία

u : Η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας, μετρημένη σε ύψος 2 m

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα στην παραπάνω σχέση για τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα σε λίτρα :

	Τιμές μοντέλου Doorenbos - Pruitt	Τιμές Εργαστηρίου	Διαφορά
Αύγουστος	144.3	377.5	233.2
Σεπτέμβριος	111.3	377	265.7
Οκτώβριος	72.8	269	196.2

Η τροποποιημένη αυτή μέθοδος, δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα από την αρχική αλλά απαιτεί περισσότερα δεδομένα εισόδου. Έτσι, χάνει το πλεονέκτημα της χρήσης λιγότερων δεδομένων εισόδου, διατηρώντας παράλληλα το μειονέκτημα της εμπειρικής, χωρίς φυσική θεμελίωση, έκφρασής της. Πάντως στην Ελλάδα, η τροποποιημένη εξίσωση Blaney – Criddle έχει θεσμοθετηθεί, μαζί με τη μέθοδο Doorenbos – Pruitt, ως μία από τις εγκεκριμένες μεθόδους εκτίμησης των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών. (Υπουργείο Γεωργίας, 1992).

Συγκεντρωτικά από όλα τα μοντέλα προκύπτει ο εξής πίνακας :

	Τιμές Εργαστηρίου	Τιμές Thornthwaite	Τιμές Hargreaves	Τιμές Blaney – Criddle	Τιμές Doorenbos - Pruitt
Αύγουστος	377.5	72.8	82.2	122.5	144.3
Σεπτέμβριος	377	52.3	65.6	102.1	111.3
Οκτώβριος	269	31.2	47.5	85	72.8

Από τις παραπάνω τιμές προκύπτει ότι οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής που υπολογίζουμε στο εργαστήριο παρουσιάζουν μια αυξητική τάση το Σεπτέμβριο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η βλάστηση που υπάρχει συνεχώς αυξάνεται και βγαίνουν καινούργια καλάμια, ενώ κατά τον Οκτώβριο αρχίζουν να ξεραίνονται ορισμένα από αυτά γι' αυτό και παρατηρείται αυτή η μικρή μείωση. Από τα μοντέλα, ο Thornthwaite και ο Hargreaves δίνουν αρκετά μικρές προσεγγίσεις της υπολογιζόμενης εξατμισοδιαπνοής, ενώ οι Blaney – Criddle και οι Doorenbos – Pruitt φαίνεται να δίνουν μεγαλύτερες τιμές διότι λαμβάνουν υπόψη τους το είδος της βλάστησης (φυτικός συντελεστής) και την υγρασία. Ωστόσο οι υπολογιζόμενες τιμές της εξατμισοδιαπνοής είναι υποεκτιμημένες σε μεγάλο βαθμό και δεν συμβαδίζουν με την πραγματικότητα. Ο λόγος είναι ότι τα μοντέλα αυτά, είναι βασισμένα σε εμπειρικούς κανόνες και εμπειρικές σταθερές και δεν συμβαδίζουν με τα εργαστηριακά δεδομένα.

4.6 Ανάπτυξη της βλάστησης

Εξαιτίας των υψηλών συγκεντρώσεων θρεπτικών στην είσοδο και της εποχής που έγινε το πείραμα ήταν λογικό να υπάρχει μια συνεχής ανάπτυξη της βλάστησης όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες.

- Στην αρχή λειτουργίας της μονάδας, όταν στήθηκε ο υγροβιότοπος



- Ανάπτυξη της βλάστησης



- Στις αρχές Ιουλίου



- Αρχές Νοεμβρίου – τέλος πειραματικής διαδικασίας



Η μεγάλη ανάπτυξη των φυτών οφείλεται στη μεγάλη συγκέντρωση των θρεπτικών στο λύμα σε συνδυασμό με την εποχή που έγινε η πειραματική διαδικασία. στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για τη διάμετρο των καλαμιών.

	1 ^ο Στάδιο		2 ^ο Στάδιο	
Ημερομηνία	Εμβαδόν m ² της βλάστησης	Ποσοστό επί της συνολικής επιφάνειας	Εμβαδόν m ² της βλάστησης	Ποσοστό επί της συνολικής επιφάνειας
2/7/05	0.0012	0.50%	0.002	0.83%
2/11/05	0.0056	2.36%	0.0032	1.35%

Αρχικά τα καλάμια στη δεύτερη δεξαμενή παρουσίασαν καλύτερη ανάπτυξη σε σχέση με τα αντίστοιχα της πρώτης και αυτό οφείλεται στο υπόστρωμα στο οποίο τοποθετήθηκαν. Στην πρώτη δεξαμενή τα καλάμια τοποθετήθηκαν σε χαλίκι με συγκεντρώσεις ανθρακικού ασβεστίου ενώ, στη δεύτερη σε χαλαζιακή άμμο. Η ανοχή

των καλαμιών σε ανθρακικό ασβέστιο είναι μέτρια, ενώ έχουν μεγάλη ανοχή σε αναερόβιες συνθήκες και έτσι δεν επηρεάστηκαν από τις υψηλές συγκεντρώσεις του COD στην είσοδο. [15] Μετά την πάροδο του καλοκαιριού, και λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων σε θρεπτικά, τα καλάμια στο πρώτο στάδιο αναπτύχθηκαν πολύ περισσότερο και καταλαμβάνουν περισσότερο εμβαδό σε σχέση με αυτά που βρίσκονται στο δεύτερο στάδιο.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα – Προτάσεις

Από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και όπως αναμενόταν με βάση τη βιβλιογραφία. Βέβαια, αν δεν περάσει ένας ολόκληρος χρόνος ώστε το σύστημα να λειτουργήσει και κάτω από τελείως διαφορετικές συνθήκες, για παράδειγμα καιρικές συνθήκες ή διαφορετικά στάδια στον κύκλο ζωής της βλάστησης, δεν μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα με ασφάλεια. Παρόλα αυτά :

1. Έχει επιτευχθεί μεγάλη απομάκρυνση οργανικού φορτίου (BOD_5) και στις δυο γραμμές. Πιο συγκεκριμένα επιτυγχάνεται 92% απομάκρυνση BOD_5 στη γραμμή χωρίς βλάστηση και 91% απομάκρυνση στη γραμμή με φυτά
2. Η απομάκρυνση του COD είναι της τάξης του 94% για τη γραμμή χωρίς βλάστηση και 87% για την γραμμή με φυτά. Εντούτοις, εάν εκφράσουμε τις τιμές των συγκεντρώσεων σε μάζα, τότε τα ποσοστά απομάκρυνσης διαφοροποιούνται και γίνονται 95% για τη γραμμή χωρίς βλάστηση και 96% για τη γραμμή με φυτά
3. Η απομάκρυνση του ολικού αζώτου είναι της τάξης του 63% για την γραμμή χωρίς βλάστηση και 76% για τη γραμμή με φυτά. Οι απομακρύνσεις αυτές είναι από τις μικρότερες που λαμβάνουν χώρα στον τεχνητό υδροβιότοπο.
4. Η αμμωνία απομακρύνεται κατά 67% στη γραμμή χωρίς βλάστηση και 83% στη γραμμή με φυτά. Αξιοσημείωτη είναι η σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία, καθώς η συμπεριφορά των δύο γραμμών είναι η ίδια σε ότι αφορά το πρώτο στάδιο και διαφοροποιούνται σημαντικά στο δεύτερο
5. Στον τεχνητό υδροβιότοπο, ανεξάρτητα από τη διακύμανση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στην είσοδο η τελική εκροή ήταν σχεδόν πάντα σταθερή και στις δυο γραμμές και σε αρκετά χαμηλά επίπεδα. Η συνολική απομάκρυνση που λάμβανε χώρα και στις δύο γραμμές είναι 98% και λόγω του ότι ο υδροβιότοπος δεχόταν ανεπεξέργαστα λύματα, κατατάσσεται από τους πιο λειτουργικούς στο είδος του
6. Στα ιόντα, έχει επιτευχθεί ικανοποιητική απομάκρυνση με εξαίρεση τα φωσφορικά όπου παρατηρούνται τα χαμηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης από όλα τα πειραματικά δεδομένα. Αυτά είναι 21% για τη γραμμή χωρίς βλάστηση και 43% για τη γραμμή με φυτά

7. Αξιοσημείωτη είναι η απομάκρυνση του φθορίου, που είναι της τάξης του 90% για τη γραμμή χωρίς βλάστηση και 80% για τη γραμμή χωρίς φυτά. Ο λόγος είναι η παρουσία ανθρακικού ασβεστίου στο υπόστρωμα, όπου αντιδρά με το φθόριο και παράγεται ο απατίτης $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$
8. Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής, είναι ένας αρκετά δύσκολος υπολογισμός καθώς το φαινόμενο αυτό, είναι πολυσύνθετο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Τα μοντέλα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία είναι αρκετά, αλλά χρειάζονται αρκετά μετεωρολογικά δεδομένα και στηρίζονται σε πολλές εμπειρικές σταθερές, οπότε εμπεριέχουν αρκετά λάθη στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής και συνήθως γίνεται υποεκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής
9. Από τα μοντέλα της εξατμισοδιαπνοής, ο Thornthwaite και ο Hargreaves δίνουν αρκετά μικρές προσεγγίσεις της υπολογιζόμενης εξατμισοδιαπνοής, ενώ οι Blaney – Criddle και οι Doorenbos – Pruitt φαίνεται να δίνουν μεγαλύτερες τιμές διότι λαμβάνουν υπόψη τους το είδος της βλάστησης (φυτικός συντελεστής) και την υγρασία. Ωστόσο οι υπολογιζόμενες τιμές της εξατμισοδιαπνοής είναι υποεκτιμημένες σε μεγάλο βαθμό και δεν συμβαδίζουν με την πραγματικότητα

Με σκοπό πάντα την καλύτερη απόδοση του συστήματος υπάρχουν κάποια πράγματα, σε ότι αφορά την λειτουργία του, που θα μπορούσαν να αλλάξουν ή να γίνουν διαφορετικά εξ αρχής όπως :

1. Περαιτέρω ανύψωση του αγωγού στην έξοδο, ιδιαίτερα στην γραμμή με βλάστηση, ώστε να αυξηθεί το πάχος της ζώνης υπό συνθήκες κορεσμού ώστε να αυξηθεί η κατανάλωση οργανικού φορτίου από χημειοτερότροφους οργανισμούς και η ανοξική οξείδωση της αμμωνίας
2. Ανακυκλοφορία της εξόδου στο δεύτερο στάδιο για επιπλέον απομάκρυνση ολικού αζώτου και φωσφορικών
3. Αύξηση του αριθμού των δόσεων που εφαρμόζονται στο σύστημα την ημέρα τροφοδοσίας με αντίστοιχη μείωση του όγκου που εφαρμόζεται σε κάθε δόση
4. Μάλλον θα έπρεπε το υπόστρωμα να είχε μεγαλύτερο ύψος που να έφτανε τουλάχιστον τα 80 cm για μεγαλύτερο χρόνο παραμονής του λύματος στο πρώτο στάδιο κάθε γραμμής
5. Να γίνει συγκομιδή της βλάστησης για αν αποφευχθεί το φαινόμενο της επαναισροής θρεπτικών στο σύστημα

6. Για ένα καλύτερο υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, θα πρέπει να υπολογίσουμε τον πραγματικό όγκο που κατακρατείται στο καλάμι. Αυτό γίνεται εργαστηριακά, εάν κόψουμε ένα καλάμι και το ξηράνουμε. Από τη διαφορά του βάρους μπορούμε να υπολογίσουμε τον πραγματικό όγκο που κατακρατείται.

Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά και είναι όπως τα περιμέναμε με βάση τη βιβλιογραφία και τις δημοσιεύσεις. Πρέπει να αναφερθεί ότι τα πειράματα γίνανε με πολύ ισχυρό λύμα. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι ένα σύστημα που στην πλειοψηφία των περιπτώσεων έχουν εφαρμογή σε αγροτικές περιοχές με λύμα πιο "αδύναμο" σε σύγκριση με αυτό που γινόταν η τροφοδοσία, οπότε αν το σύστημα είχε αν όχι την ίδια, αλλά παραπλήσια συγκέντρωση, τότε τα αποτελέσματα στην έξοδο πιθανόν να ήταν διαφορετικά. Άλλωστε η ικανότητα των τεχνητών υγροβιοτόπων να επεξεργάζονται τα αστικά λύματα είναι αδιαμφισβήτητη. Μέσα σε όλα αυτά θα πρέπει να συμπεριληφθεί και το φτηνό κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Αυτός είναι και ο λόγος που οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν ικανή λύση για σωστή διαχείριση υγρών αποβλήτων σε αποκεντρωμένες περιοχές.

Βιβλιογραφία

1. U.S. Environmental Protection Agency **“A handbook of constructed wetlands, a guide to creating wetlands”** Volume1
2. Αγγελάκης, Α.Ν. και Τσαγκαράκης Κ.Π., **“Φυσικά συστήματα επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων – Αρχές σχεδιασμού και λειτουργίας”**, Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας, Ινστιτούτο Ηρακλείου, 2002
3. Α.Ν. Αγγελάκης – G. Tchobanoglous **“Υγρά απόβλητα – Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επαναχρησιμοποίηση και Διάθεση Εκροών”**, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, 1995
4. Kadlec R.C. and Knight R., **“Treatment Wetlands”**, Lewis Publishers, Boca Raton, Fla, 1996
5. Water Environment Federation, **“Natural Systems for Wastewater Treatment”, Manual of Practice FD-16**, 2nd Edition Water Environment Federation Alexandria, USA, 2001
6. Sinclair Knight Merz, **“Guidelines for Using Free Water Surface Constructed Wetlands to treat Municipal Sewage”**, Queensland Government-Department of Natural Resources, 2000
7. Μαργαρίτα Χ. Βατυλιώτου, **“Σχεδιασμός και Προσομοίωση Τεχνητών Υδροβιότοπων Επιφανειακής Ροής για την Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων”**, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2004
8. Crites R.W. and Tchobanoglous G., **“Small and Decentralized Wastewater Management Systems”**, McGraw Hill, New York, 1998
9. U.S. Environmental Protection Agency **“Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters”**, EPA625-R-99-010, Office of Research and Development, USA, 2000
10. Sherwood C. Reed, Ronald W. Crites and E. Joe Middlebrooks **“Natural Systems for Waste Management and Treatment”**, 2nd Edition McGraw Hill, 1995
11. Lienard Alain et. al **“How to Treat Sewage with Constructed Wetlands : An overview of the French Systems”**
12. Lienard Alain and Molle Pascal, **“Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in France : from experience to design and Operation Recommendations”** Cemagref, Water Quallity and Pollution Control, Research Unit

13. Blazejewski Ryszard and Blazejewska Sadsine Murat, **“Soil Clogging Phenomena in Constructed Wetlands with Subsurface Flow”** Water Science and Technology, volume 35, issue 5, pp183-188, 1997
14. Voisin Jean and Paing Joelle **“Vertical Flow Constructed Wetlands for Municipal Wastewater and Septage Treatment in French Rural Area”**
15. U.S.E.P.A. Office of Water **“Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, A Technology Assessment”** EPA 832- R – 93 – 008, 1993
16. Γ.Τσακίρης **“Υδατικοί πόροι : Ι. Τεχνική Υδρολογία”** , Εκδόσεις Συμμετρία, 1995
17. Werner Stumm and James J. Morgan **“Aquatic Chemistry – An Introduction Empphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters”** 2nd Edition ,1981
18. Γεώργιος Μανουσάκης, **“Χημεία – Με στοιχεία Περιβαλλοντικής Μηχανικής και Οικολογίας”** Εκδοτικός Οίκος Αφών Κυριακίδη, 1985
19. Κουτσογιάννης Δ. και Ξανθόπουλος Θ. **“Τεχνική Υδρολογίας”** Έκδοση 3, Ε.Μ.Π., 1999
20. Julie K. Cronk and M. Siobhan Fennessy, **“Wetland Plants – Biology and Ecology”**, Lewis Publishers, 2001
21. Προχάσκα Χαρίκλεια, **“Μελέτη της επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων με χρήση φυσικών συστημάτων”**, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2005